

Fertigung und Erprobung eines Mikro-Wirbelstromsensors zur Abstandsmessung

Von der Fakultät Maschinenbau
der Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieurin

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Ekaterina Andreeva
geboren am 04.06.1976 in Moskau

2005

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. H.-H. Gatzert
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. F.-W. Bach
Tag der Promotion: 17.06.2005

Inhalt

Abkürzungs- und Formelverzeichnis	IV
Abstract	VII
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Wirbelstromprüfung	4
2.1.1 Prinzip der Wirbelstromprüfung	4
2.1.2 Eindringtiefe des Magnetfeldes	6
2.2 Einsatz von Wirbelstromverfahren.....	8
2.2.1 Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung	8
2.2.2 Werkstofferkennung durch harmonische Analyse von Wirbelstromsignalen	8
2.2.3 Abstands- und Wegmessung mit Wirbelstromsensoren	10
2.2.4 Sensierung mittels Feldsensoren	11
2.3 Messungen mit Wirbelstromsensoren	14
2.3.1 Induktive Messaufnehmer	14
2.3.2 Prüfspulenarten	15
2.3.3 Einsatz unterschiedlicher Prüfspulenarten bei der Wirbelstrommessung ...	18
2.3.4 Prüfspulenanordnungen	20
2.3.5 Wirbelstromsensoren in der Mikrotechnik.....	22
2.4 Sensorwerkstoffe.....	24
2.4.1 Leiterwerkstoffe für den Spulenaufbau	24
2.4.2 Isolationsmaterialien.....	26
2.4.2.1 Anorganische Isolationsmaterialien	26
2.4.2.2 Organische Isolationsmaterialien.....	27
2.4.2.3 Einsatz von Photolacken in der Mikrotechnologie	29
2.4.3 Magnetkernwerkstoffe	30
2.4.3.1 Magnetische Grundlagen	30
2.4.3.2 Magnetische Werkstoffe	32
2.4.3.3 Magnetkernwerkstoffe in der Dünnschichttechnik.....	33
2.4.3.4 Nickel-Eisen-Legierungen und ihre Eigenschaften	33
3 Aufgabe und Zielsetzung.....	35

4	Vorgehensweise	36
5	Versuchstechnik	39
5.1	Fertigungstechnologien	39
5.1.1	Schichterzeugung	39
5.1.1.1	Kathodenzerstäubung (Sputtern).....	39
5.1.1.2	Galvanische Abscheidung	40
5.1.2	Photolithographieprozess	42
5.1.3	Strukturierung dünner Schichten	47
5.1.3.1	Nasschemischer Ätzprozess	48
5.1.3.2	Trockenätzverfahren.....	49
5.2	Prozessanlagen.....	50
5.2.1	Beschichtungsanlagen	50
5.2.2	Maskenjustier- und Belichtungsanlage	51
5.2.3	Ätzanlage	52
5.3	Messtechnik.....	53
5.3.1	Topographievermessung.....	53
5.3.1.1	Tastschnittverfahren	53
5.3.1.2	Weißlichtinterferometer (WyKo).....	55
5.3.2	Messung magnetischer Eigenschaften.....	55
5.3.3	Messung der Materialeigenschaften.....	56
6	Sensordesign.....	58
6.1	Entwurf des Sensors	58
6.2	Strukturenauslegung	62
7	Sensorfertigung	68
7.1	Aufbauvariante des Wirbelstromsensors	69
7.2	Fertigungsschritte für den Aufbau des Wirbelstromsensors	69
7.2.1	Herstellung von Gruben.....	75
7.2.2	Herstellung des magnetischen Kerns	77
7.2.3	Herstellung der Spulen	79
7.2.4	Herstellung von Isolationsschichten	80
7.3	Vereinzelung und Kontaktierung.....	81
8	Experimentelle Untersuchungen am Sensor	84

8.1	Experimentelle Voruntersuchungen.....	84
8.1.1	Charakterisierung der Nickel-Eisen-Schichten	84
8.1.2	Charakterisierung von Leiterwerkstoffen	85
8.1.3	Untersuchung der Planarisierbarkeit von Isolationsschichten	89
8.2	Aufbau des Messstandes	93
8.3	Messungen am Wirbelstromsensor	94
8.3.1	Messung der in der Messspule induzierten Spannung	94
8.3.2	Abstandsmessung mit dem Wirbelstromsensor.....	97
8.3.2.1	Messung mit magnetischem Stahl.....	98
8.3.2.2	Messung mit schlecht leitendem, magnetischem Objekt	100
8.3.2.3	Messung mit leitendem, nichtmagnetischem Objekt.....	103
8.3.2.4	Vergleich der Abstandsmessungen mit unterschiedlichen Materialien	105
8.3.3	Wegmessung bei Schichten aus unterschiedlichen Materialien	107
8.3.4	Erkennung von Oberflächenfehlern bei Cu- und Stahl Messobjekten	109
9	Diskussion der Ergebnisse	113
10	Zusammenfassung	115
11	Literaturverzeichnis	117
12	Anhang	124

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
Al_2O_3	Aluminiumoxid
C	Kohlenstoff (Diamant)
CAD	Computer-Aided Design
CMP	Chemisch-mechanisches Polieren
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
DI-Wasser	Deionisiertes Wasser
DNQ	Diazonaphthoquinon
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
FEM	Finite Element Methode
GMR	Giant Magneto Resistance
IBE	Ion Beam Etching
KOH	Kaliumhydroxid
NiFe	Nickel-Eisen
PAK	Photoaktive Komponente
PGMEA	Propylenglykolmethylethylacetat
REM	Rasterelektronenmikroskop
RKM	Rasterkraftmikroskop
SiC	Siliziumcarbid
SiO_2	Siliziumoxid
Si_2N_4	Siliziumnitrid
SQUID	Superconductivity Quantum Interference Device
VSM	Vibrating Sample Magnetometer
WLI	Weißlichtinterferometer

Formelverzeichnis

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
A	m^2	Querschnittsfläche
B	T	Magnetische Flussdichte
B_R	T	Remanenzflussdichte
B_S	T	Sättigungsflussdichte
E_{ind}	V/m	Induzierte elektrische Feldstärke
H	A/m	Magnetfeld
H_{Bs}	A/m	Sättigungsfeldstärke
H_C	A/m	Koerzitivfeldstärke
H_0	A/m	Maximalwert der Amplitude
i	A	Stromstärke
i_0	A	Spulenstrom
i_P	A	Polarisationsstromstärke
J	T	Polarisation
J_S	T	Sättigungspolarisation
L	m	Länge
M	J/T	Magnetisierung
N_P	-	Anzahl der Windungen
t	S	Zeit
γ	$\mu\text{m/s}$	Geschwindigkeit des Materialabtrags
δ	μm	Eindringtiefe
ϕ_0	Wb	Magnetischer Fluss der Spule
ϕ_P	Wb	Magnetischer Fluss des Ausgangsfehlers
μ	Vs/Am	Permeabilität
μ_0	Vs/Am	Magnetische Feldkonstante

μ_r	-	Werkstoffabhängige Permeabilitätszahl
μ_{rA}	-	Amplitudenpermeabilität
μ_{ri}	-	Anfangspermeabilität
ρ	Ω/cm	Spez. Widerstand
σ	S/m	Leitfähigkeit
ω	-	Windungszahl einer Spule

Abstract

Fabrication and Testing a Thin Film Technology Eddy Current Microsensor for Proximity Measurement

Eddy current measurement is a reliable non-contact testing method. It may be applied to quite a range of different tasks: detection of subsurface damages, vibration and deformation measurement, measurement of material properties like electrical conductivity and magnetic permeability as well as proximity sensing. A promising way to manufacture eddy current microsensors is the utilization of thin film technology. A miniaturization of the eddy current sensor in thin-film technology increases sensitivity by proximity measurement.

This work presents an improved eddy current microsensor fabricated in thin film technology and clearly shows its capabilities for proximity testing on ferrous and non-ferrous metals. The sensor consists of two planar coils with a different number of windings and an E-shaped magnetic core. The magnetic core is necessary focus the magnetic field in the materials. One of the most important parameters determined during our sensor investigations is the distance between sensor and inspection material. For minimizing the distance our approach was to create a cavity for the contact pads in which these pads were recessed during the fabrication of the eddy current structure.

The test parameters were given by the probe materials (magnetic steel, non-conducting NiZn-ferrite and Cu). The distance between sensor and surface was varied (10 μ m to 1000 μ m), just as the frequency in a range of 100 kHz to 1 MHz. The measurements show an increase of sensitivity with higher frequencies. The measurements of the manufactured sensors show the suitability of our prototypes for proximity measurements.

Keywords: Eddy Current, proximity measurement, thin film technology, microsensor

Abstract

Fertigung und Erprobung eines dünnfilmtechnischen Wirbelstromsensors zur Abstandsmessung

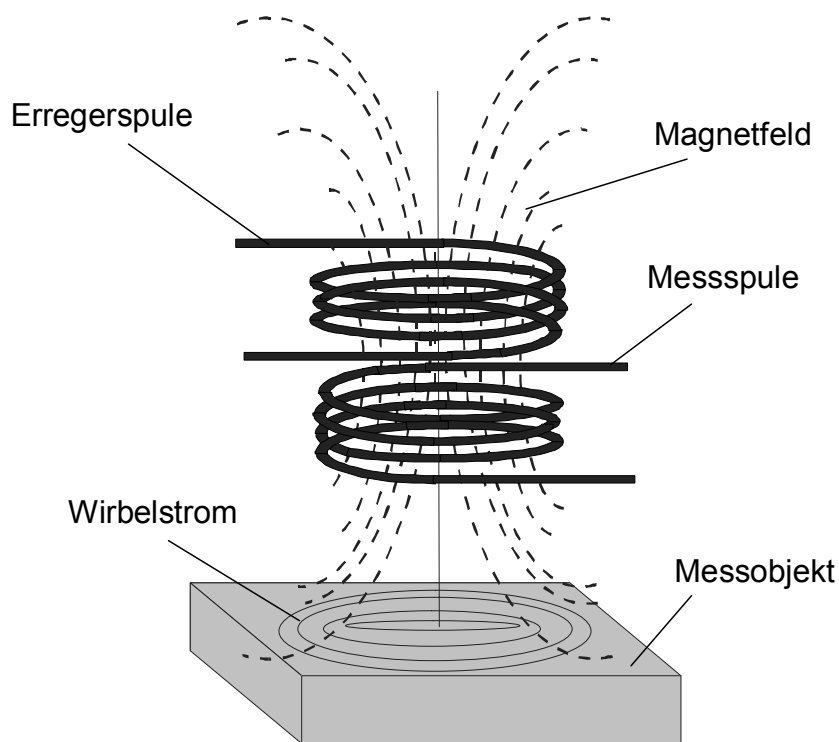
Wirbelstrommessung ist ein einfacher und zuverlässiger Ansatz um berührungslos den Abstand zu leitenden Messobjekten zu bestimmen. Das Anwendungsgebiet von Wirbelstromsensoren als Wegaufnehmer ist sehr breit und beinhaltet nicht nur Weg- oder Abstandsmessung sondern auch Vibrations-, Verformungs-, Verkippungs- und Rundlaufmessung. Eine Miniaturisierung des Wirbelstromsensors erhöht bei kleinen Messabständen die Auflösung. Eine Möglichkeit zur Bauteilgrößenverminderung bietet die Dünnschichttechnik.

Diese Arbeit präsentiert Entwicklung und Fertigung eines dünnfilmtechnischen Wirbelstromsensors zur Abstandsmessung und dessen Erprobung. Unterschiedliche Varianten des Sensors wurden ausgeführt und miteinander verglichen, um einen optimalen Aufbau zu erzielen. Als bestes Design hat sich die Variante mit magnetischem Kern und tief gelegten Kontaktpads erwiesen. Dabei hilft das Vorhandensein eines Kerns bei der Fokussierung des magnetischen Feldes im Messobjekt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden mit den gefertigten Wirbelstromsensoren Abstandsmessungen von 10 μm bis 1 mm bei Frequenzen im Bereich zwischen 100 kHz und 1 MHz durchgeführt. Die Messungen zeigen, dass das System bei höheren Frequenzen eine höhere Empfindlichkeit besitzt.

Schlüsselwörter: Wirbelstrom, Abstandsmessung, Dünnschichttechnik, Mikrosensor

1 Einleitung

Mit Wegmesssensoren lässt sich heute eine Vielfalt an Mess- und Prüfaufgaben lösen, wobei physikalische Effekte zur Messung von Abständen, Dicken oder Positionen genutzt werden. Bei der Prüfung elektrisch leitfähiger Werkstoffe haben Sensoren, die nach dem Wirbelstromprinzip arbeiten, große Bedeutung erlangt. Auf dem Wirbelstromprinzip basierende Wegmesssensoren arbeiten verschleiß- und wartungsfrei und werden für Messungen an Objekten aus elektrisch leitenden Werkstoffen verwendet [SAD00]. Diese können ferromagnetische oder nichtferromagnetische Eigenschaften haben. Die Wirbelstrommessung ist mittlerweile zu einem Standardverfahren zur Prüfung von Bauteilen gediehen. Das Wirbelstromverfahren ermöglicht nicht nur die berührungslose Ermittlung von Werkstofffehlern, sondern auch von Materialparametern. Die große Unempfindlichkeit z.B. gegenüber Öl, Schmutz, Wasser oder elektromagnetischen Störfeldern präsentiert dieses Messprinzip auch für Einsätze in kontaminationsbehafteten Umgebungen.



2005 int 5017-001

Bild 1.1: Grundprinzip der Wirbelstrommessung

Das Grundprinzip der Wirbelstrommessung basiert auf der Detektion der Rückwirkung von Wirbelströmen, die in einem leitfähigen Prüfobjekt induziert werden (Bild 1.1). Hierbei werden mit Hilfe eines von einer bestromten Spule erzeugten magnetischen Wechselfeldes Wirbelströme in einem leitfähigen Prüfteil induziert, die wiederum den Aufbau eines entgegenwirkenden magnetischen Wechselfeldes erzeugen. Dieses Wechselfeld wird normalerweise über eine zweite Spule ausgewertet [MAA01].

Das Messverfahren basiert auf dem Induktionseffekt eines zeitlich veränderlichen magnetischen Feldes. Wirbelstromsensoren können deshalb sowohl mit einer Einzelspule aufgebaut sein - in diesem Fall ändert sich auf Grund der Magnetfelder der Wirbelströme die Impedanz - oder mit zwei Spulen. In letztem Fall erfolgt die Erfassung der induktiven Spannung, welche auch wieder von der Stärke der Wirbelströme abhängt. Im Fall einer Materialabweichung, wie z.B. bei Materialfehlern oder einer Gefügeänderung im Bereich der Wirbelstromerzeugung, ändern sich auch die lokalen Werkstoffeigenschaften, was zur Änderung des Wirbelstromes führt. Im Fall von Minirissen tritt eine Schwächung auf. Diese Schwächung des Wirbelstroms zieht eine Verringerung des Sekundärfeldes nach sich. Die Signaländerung zwischen dem Primär- und Sekundärfeld wird aufgenommen und ausgewertet.

2 Stand der Technik

Eine industrielle Anwendung des Wirbelstromsensors stützt sich auf die Abhängigkeit des Messverfahrens von den Materialeigenschaften und dem Abstand des Sensors zu einem Messobjekt. Durch die Abhängigkeit von mehreren Parametern ergibt sich gleichzeitig eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsmöglichkeiten. Bild 2.1 zeigt Anwendungsmöglichkeiten für den Wirbelstromsensor.

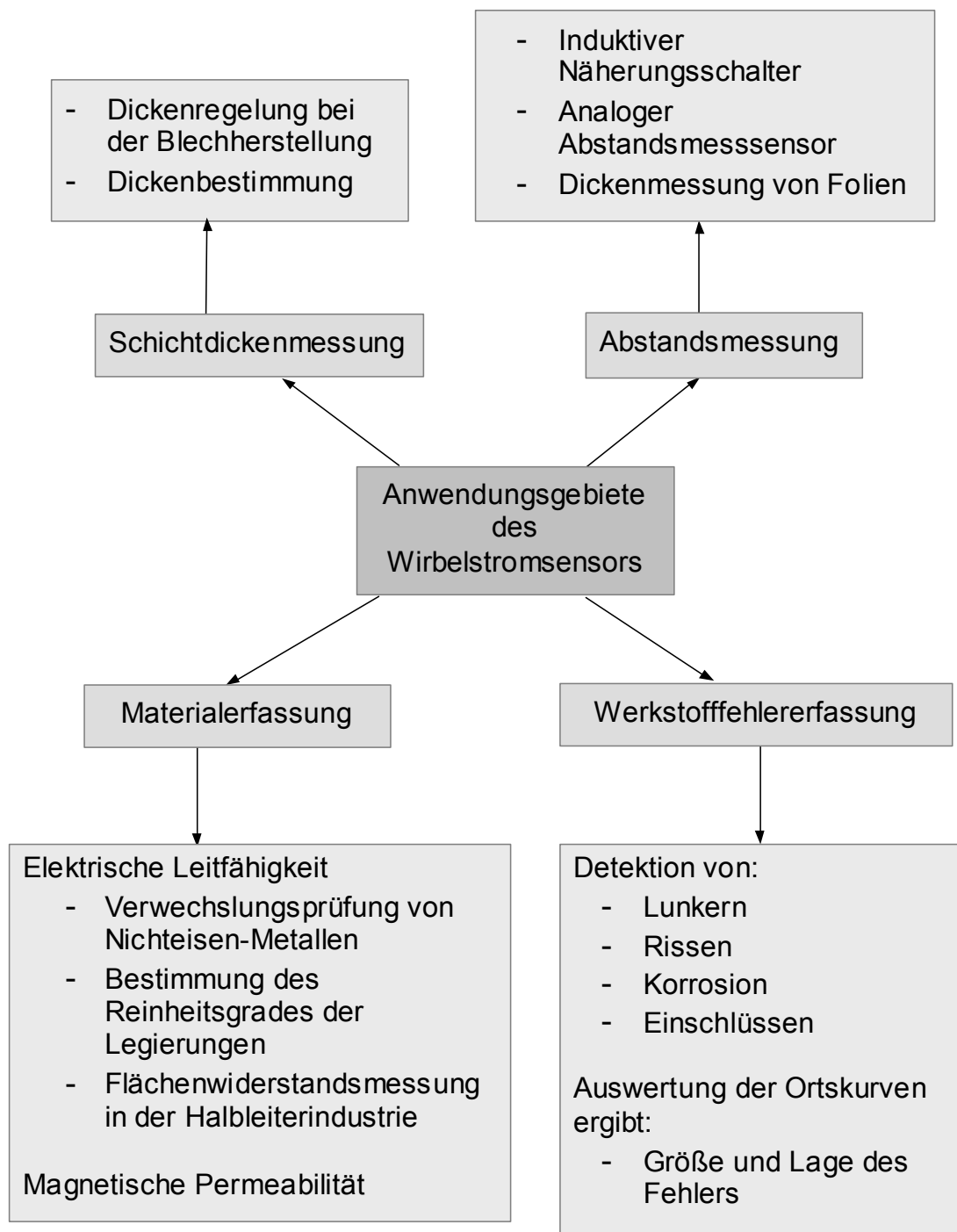


Bild 2.1: Anwendungsbereiche des Wirbelstromsensors [RÖP99]

Die Wirbelstromprüfung mit Spulensystemen wird häufig zur Prüfung von Flugzeugteilen eingesetzt. Der für die Prüfung zugängliche Bereich unterhalb der Oberfläche hängt von der Frequenz ab, mit der die Wirbelströme erregt werden. Je höher die Frequenz, desto stärker schirmt das Material das Eindringen der Anregungsfelder ab, so dass nur noch oberflächennahe Fehler detektiert werden können. Mit niedrigen Anregungsfrequenzen kann man tiefer liegende Fehler finden. Mit abnehmender Frequenz sinkt allerdings bei den Spulensystemen die Empfindlichkeit und mit zunehmender Tiefenlage nimmt die auffindbare Fehlergröße zu. Die Empfindlichkeitsverluste können zum Teil durch größere Spulen kompensiert werden, jedoch wird mit wachsenden Durchmessern der Spulen die Ortsauflösung schlechter.

2.1 Wirbelstromprüfung

2.1.1 Prinzip der Wirbelstromprüfung

Nach DIN 54140 Teil 1-3 basiert das Grundprinzip des Wirbelstrommessverfahrens auf der Detektion der Induktionswirkung von Wirbelströmen, die in einem leitfähigen Prüfobjekt induziert werden.

Induzierte Wirbelströme entstehen dem Faradayschen Induktionsgesetz nach in einem elektrisch leitenden Körper, wenn dieser sich in einem zeitlich veränderlichen Magnetfeld befindet [SAW02]. Die Induktion wird durch die Maxwellschen Feldgleichungen (Induktionsgesetz) beschrieben [KÜP90]:

$$\operatorname{rot} \vec{E}_{\text{Ind}} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (2.1)$$

Dabei ist \vec{B} die anregende magnetische Flussdichte und \vec{E}_{Ind} die induzierte elektrische Feldstärke.

Der Wechselstrom erzeugt ein wechselndes Magnetfeld, dessen Flussstärke ϕ_P proportional zur Anzahl der Spulenwindungen N_P und der Strom i_P ist:

$$\phi_P \sim N_P \cdot i_P. \quad (2.2)$$

Wenn das Messobjekt elektrisch leitend ist, fließen elektrische Ströme, die kreisförmige Feldlinien aufweisen. Diese Wirbelströme erzeugen nach der Lenzschen Regel (Gl. 2.3) einen magnetischen Fluss, der dem Magnetfeld der Spule entgegenwirkt. Das aus dieser Überlagerung resultierende Magnetfeld (Gl. 2.4) lässt sich direkt aus der Änderung der Flussstärke der Spulen ablesen.

$$\phi_O \sim i_O \quad (2.3)$$

$$\phi_M = \phi_P - \phi_O. \quad (2.4)$$

Dabei ist ϕ_P der magnetische Fluss des Ausgangsfehlers und ϕ_O der magnetische Fluss der Spule.

Die Magnetisierungsprozesse laufen in Abhängigkeit von der Feldstärke des magnetisierenden Feldes ab. Das von der Spule erzeugte Magnetfeld H ist proportional zur Stromstärke i und der Windungszahl w einer Spule der Länge l gemäß:

$$H = i \frac{w}{l} \quad (2.5)$$

Das Induktionsgesetz ist auch einsetzbar, um die induzierte Spannung als Magnetfelddetektor der Empfängerspule zu beschreiben [GHE82]. Bei hohen Frequenzen ist die Empfindlichkeit der Empfängerspule sehr hoch, weil die Größe der induzierten Spannung in der Empfängerspule mit der Frequenz korreliert. Bei niedrigeren Frequenzen muss die geringere Empfindlichkeit der Spule durch vergrößerte Abmessungen kompensiert werden.

Bild 2.2 zeigt die schematische Darstellung einer Messung mit einem Wirbelstromsensor. Als Messobjekt wird ein leitendes magnetisches Material herangezogen. Bei der Messung erzeugt eine Erregerspule ein magnetisches Wechselfeld (Bild 2.2.a). Dieses Wechselfeld induziert Wirbelströme in einem leitenden Messobjekt (Bild 2.2.b). Diese Wirbelströme sind ihrerseits von einem Magnetfeld umgeben (Bild 2.2.c), das dem magnetischen Wechselfeld entgegenwirkt und dieses schwächt (Bild 2.2.d). Je stärker die induzierten Wirbelströme im Messobjekt sind, desto mehr wird das erregende Wechselfeld geschwächt. Eine Messspule erfasst das resultierende Gesamtfeld (Bild 2.2.e).

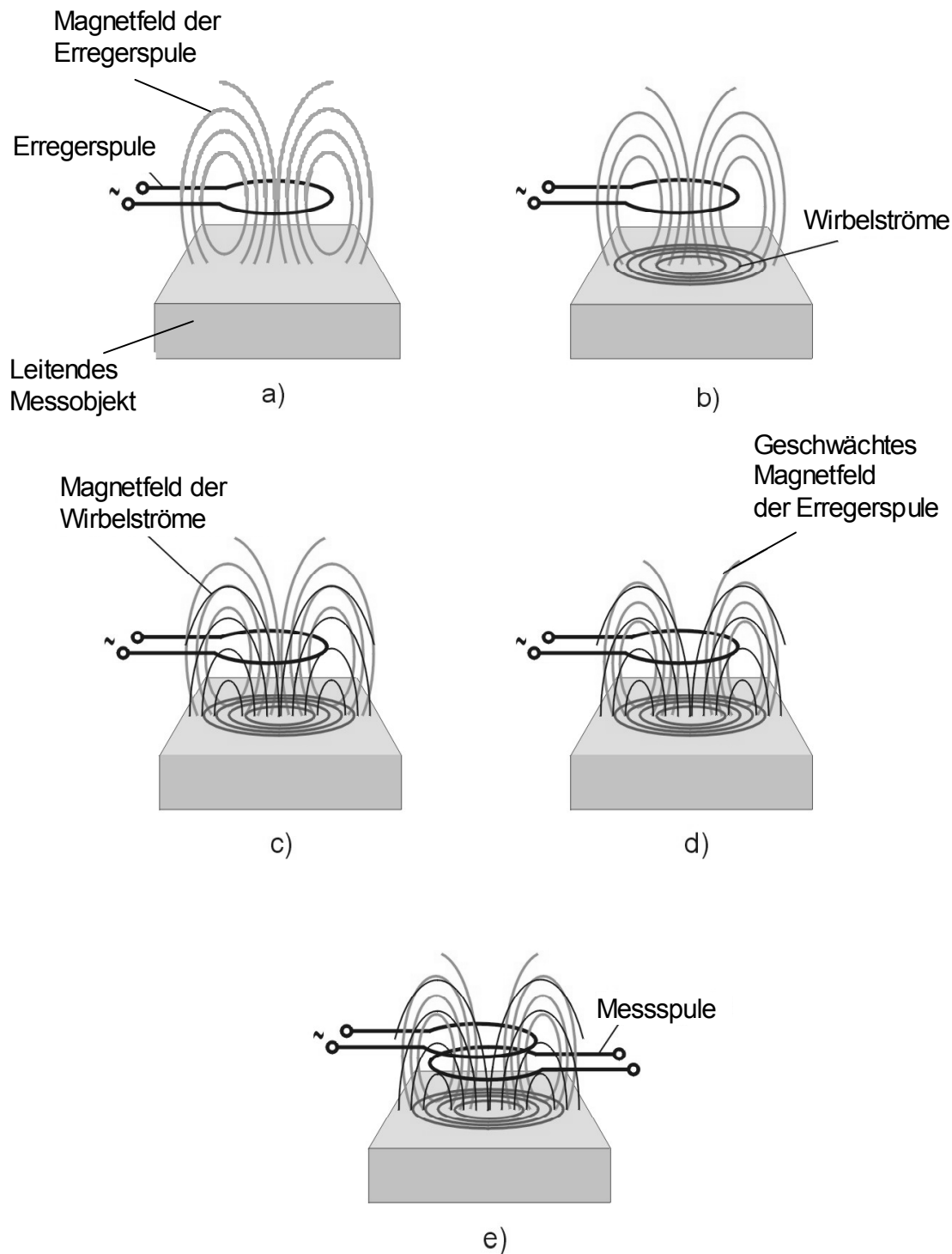


Bild 2.2: Schematische Darstellung einer Wirbelstrommessung [GAT02]

2.1.2 Eindringtiefe des Magnetfeldes

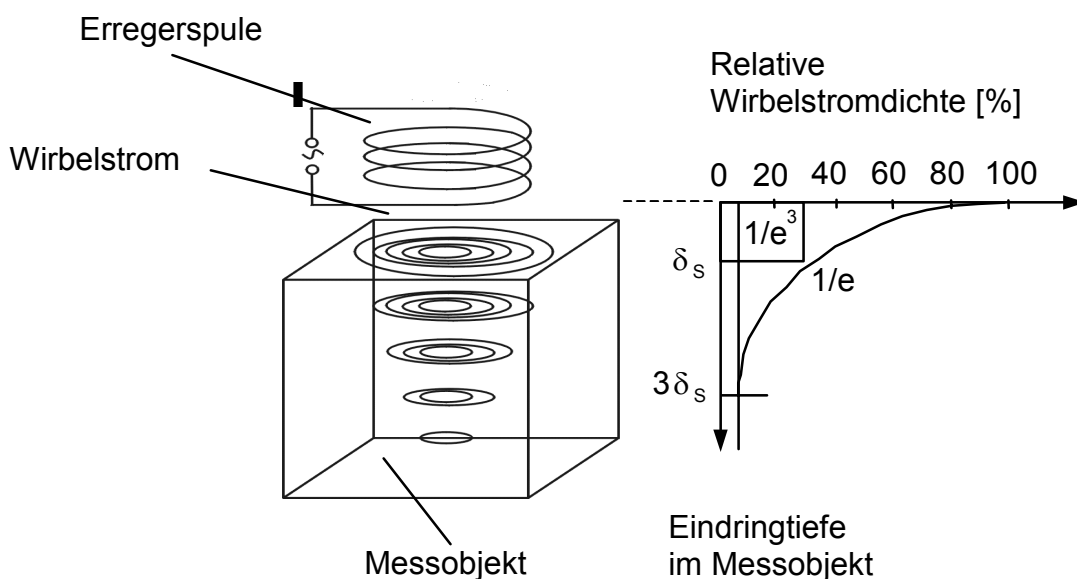
Die Feldverteilung im Messobjekt wird hauptsächlich durch die vertikale Verteilung (Eindringtiefe) und die Verteilung entlang der Oberfläche (Wirkbreite) beschrieben. Diese Werte zeigen definierte Abschwächungen der Wirbelstromdichte unterhalb des Sensors. Die Wirkbreite zeigt eine Reduzierung der Wirbelstromdichte bezogen auf den maximalen Messbereich und dient zur Abschätzung des Ortsauflö-

sungsvermögens des Sensors für eine bestimmte Anregungsfrequenz. Die Eindringtiefe charakterisiert die Reduzierung der Wirbelstromdichte in Abhängigkeit von der Objektiefe. Das Eindringen des Magnetfeldes im elektrisch leitenden, unendlich ausgedehnten ($-\infty < z < 0$) Messobjekt kann nach folgender Formel ermittelt werden:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (2.6)$$

dabei ist δ die Eindringtiefe, ω die Windungszahl, μ die Permeabilität und σ die Leitfähigkeit.

Diese Formel steht zwar im Widerspruch zur wirklichen Abschwächung der Wirbelstromdichte, weil das elektromagnetische Feld als homogene und ebene Welle angesehen wird, ermöglicht aber mithilfe der Wirkbreite eine gute Abschätzung der Wirbelstromverteilung in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz (Bild 2.3). Die Wirbelstromverteilung ist nicht allein von der Frequenz, sondern auch in starkem Maß von der Form und Anordnung der Erregerspule abhängig.



2005 int 5017-004

Bild 2.3: Eindringtiefe des Magnetfeldes

Die Eindringtiefe der Wirbelströme ins Material zeigt, in welchem Volumen des Prüfobjektes das Magnetfeld von der Spule erfasst werden kann und in welchem Bereich die für eine aussagekräftige Messung ausreichende Stromdichte vorhanden ist. Die Intensität und räumliche Verteilung der Wirbelströme ist vom Abstand zwischen Prüfobjekt und Messsensor, der elektrischen Leitfähigkeit und der magnetischen Permeabilität des Prüfmateri als, den Abmessungen des Objektes und potentiellen Werkstofffehlern abhängig.

Um einerseits eine bessere magnetische Kopplung zwischen den Spulen zu erzielen, andererseits das magnetische Feld auf das Material zu konzentrieren und

damit die Auflösung von Messungen zu verbessern, werden die Spulen der Wirbelstromsensoren mit einem magnetischen Kern ausgestattet. Der Kern beeinflusst nicht nur die Wirbelstromverteilung der Erregerspule, sondern erzielt auch wesentlich höhere Messempfindlichkeiten der Messspule. Bei der Auswahl eines geeigneten Kernmaterials spielen magnetische Eigenschaften des Werkstoffs, speziell die Permeabilität, eine sehr große Rolle.

2.2 Einsatz von Wirbelstromverfahren

2.2.1 Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung

Zeitgemäße, zerstörungsfreie Prüftechniken sind ein wesentlicher Bestandteil heutiger Qualitätssicherungsmaßnahmen. Besonders die Integration digitaler Elemente und ihre Verbindung mit leistungstärkeren Rechnerkomponenten steigert das Prüfpotential des Verfahrens [NEH92, MOS96].

Im Bereich zerstörungsfreier Materialprüfung hat das Wirbelstromverfahren breite Anwendung im Bereich der Prüfung von Inhomogenitäten, wie z.B. Rissen, Korrosionen usw., in Messobjekten gefunden [AUF96, SAN01]. Da Leitfähigkeit und Permeabilität bei den meisten Materialien temperaturabhängige Funktionen sind, eignet sich das Wirbelstromverfahren auch zur Temperaturmessung [SCH89]. Die berührungslose Temperaturmessung unter Vernachlässigung des Abstandseinflusses wird in [RÖP98] und [JAH96] vorgestellt.

Bei der Wirbelstromtechnik besteht nicht nur die Möglichkeit, Bauteile berührungslos zu detektieren und ihre Eigenschaften zu beschreiben, sondern auch den Werkstoff- und Gefügezustand während des gesamten Fertigungsprozesses kontinuierlich zu überwachen [BLI97, RÖP99]. Auch die Geschwindigkeitsmessung von Schienenfahrzeugen ist mit Wirbelstromsensoren möglich [ENG01].

Häufig wird das Wirbelstromverfahren zur Untersuchung der Oberflächen von Rohren, Drähten und anderen Langprodukten herangezogen. Daneben wird es zum Nachweis von Oberflächenfehlern an leitenden nichtmagnetischen Bauteilen eingesetzt [LAT89]. Eine weitere industrielle Anwendung beruht auf der Abhängigkeit der Messgröße vom Abstand des Sensors zum Messobjekt. Dabei können nicht nur die einzelnen Schichtdicken [FIS82, FIS88] und die Gesamtdicke des Objektes gemessen [NIT97], sondern auch Positionbestimmungen, Vibrations- und Rundungsmessungen durchgeführt werden.

2.2.2 Werkstofferkennung durch harmonische Analyse von Wirbelstromsignalen

Die harmonische Analyse von Wirbelstromsignalen gehört zur Gruppe der indirekten magnetoinduktiven Prüfverfahren und kann zur Klassifizierung von Werkstoffen eingesetzt werden. Das Verfahren der Bestimmung von Werkstoffeigenschaften mit harmonischer Analyse stützt sich darauf, dass der Zustand eines Werkstoffes seine mechanischen, magnetischen und physikalischen Eigenschaften bestimmt [SCH98].

Bei dieser Analyse werden Amplituden- und Phasenwerte von harmonischen Oberwellen eines Wirbelstromsignals ermittelt. Diese Daten geben eine Aussage über die Form der Hysteresekurve eines ferromagnetischen Werkstoffs. Die Bestimmung der Werkstoffeigenschaften wird indirekt über die aufgezeigten physikalischen Zusammenhänge und mechanisch-technologischen Werkstoffkennwerte ermöglicht.

Das Prinzip der Entstehung von harmonischen Oberwellen ist in Bild 2.4 dargestellt. Bei diesem Messprinzip werden in dem Messsystem sinusförmige Sendesignale generiert und nach einer Verstärkung als Erregerströme einem Sendespulensystem zugeführt. Diese Erregerströme generieren ein primäres magnetisches Wechselfeld, das im Material einen Ummagnetisierungsvorgang und die Entstehung von Wirbelströmen verursacht, die von spezifischen Einflussgrößen des Materials abhängig sind [REI03].

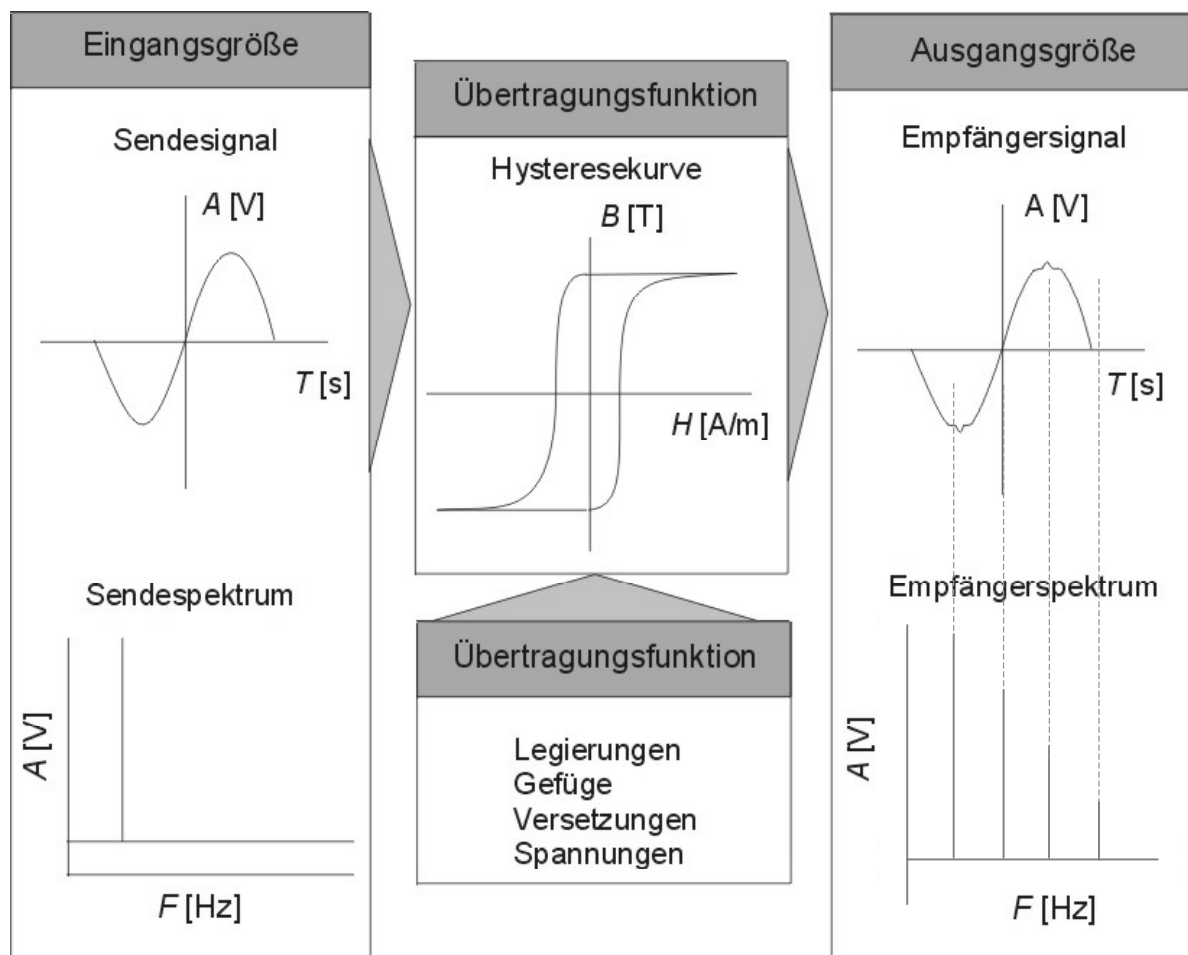


Bild 2.4: Oberwellen in Wirbelstromsignalen [KRO02]

Die Wirbelströme und Ummagnetisierungsvorgänge im Prüfobjekt induzieren ein Sekundärfeld, das durch magnetische Eigenschaften geprägt ist. Aus dieser Charakteristik des Sekundärfeldes kann mit der Empfängerspule eine resultierende Signaldifferenz gemessen werden. Bei der Überführung der Zeitsignale mit Hilfe

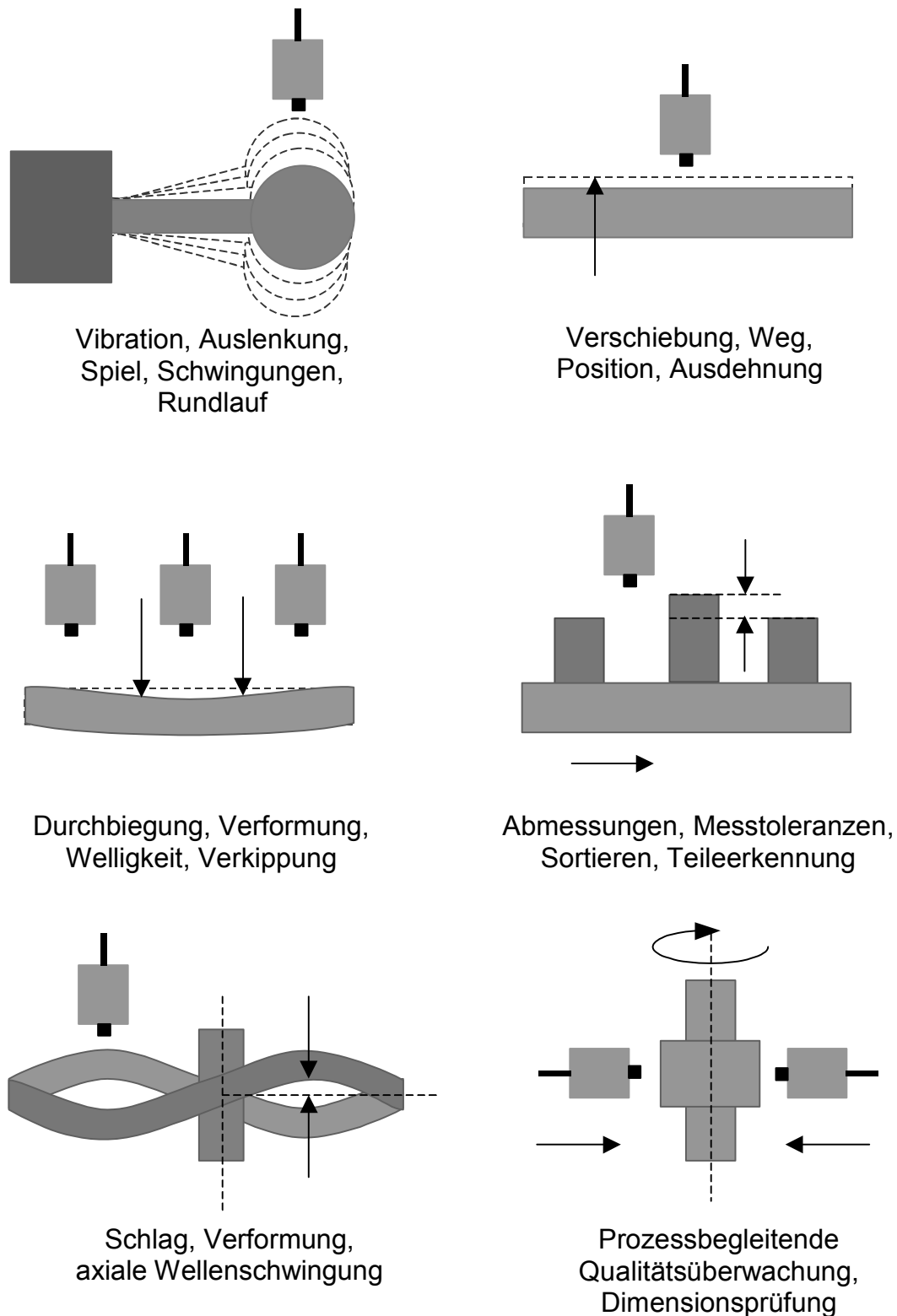
einer Fouriertransformation in den Frequenzraum besitzt das sinusförmige Eingangssignal eine diskrete Amplitude im Frequenzspektrum, während das Ausgangssignal einen Amplitudenanteil aufweist. Amplitude und Phasenverschiebung der Oberwellen werden durch die Form der Übertragungsfunktion verursacht, die Informationen über die magnetischen Eigenschaften sowie über die Form der Hystersecurve des Werkstoffes liefert. Um eine indirekte Bestimmung der mechanisch-technologischen Eigenschaften des Werkstoffes durchführen zu können, ist es notwendig, die harmonischen Oberwellen des Empfängersignals bezüglich der Amplitude und Phase zu bestimmen [KRO02].

2.2.3 Abstands- und Wegmessung mit Wirbelstromsensoren

Der Abstand zwischen der Spule und dem Messobjekt hat eine große Wirkung auf die Änderung der Spulenimpedanz und stellt bei weitem die stärkste Einflussgröße beim Wirbelstrommessverfahren dar [RÖP99]. Die Empfindlichkeit der Spule erhöht sich mit Verringerung des Abstandes zum Messobjekt. Das heißt, dass die Impedanzänderung der Spule umso größer ist, je näher sich die Spule am Messobjekt befindet [SMI75]. Dieser Effekt wird für Anwendungen im Bereich der Abstands- und Wegmessung genutzt [SEL94].

Wegmesssensoren werden überall dort benötigt, wo veränderliche Positionen erfasst werden müssen, um entweder als reiner Messwert ausgegeben zu werden oder in einem Regelkreis die Stellgröße als Messwert zur Verfügung zu stellen. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen tastenden und berührungslosen Wegaufnehmern. Zu den tastenden Wegaufnehmern zählen dabei alle Aufnehmer, die ein spezielles Objekt als Wegvermittler benötigen, das fest mit dem eigentlichen Messobjekt verbunden ist. Berührungslose Wegaufnehmer können ohne einen solchen Vermittler direkt das zu vermessende Objekt untersuchen. Gegenüber anderen Messverfahren haben die berührungslosen Wegaufnehmer den Vorteil, dass sie überall dort eingesetzt werden können, wo Schmutz, Öl, Wasser und ähnlich widrige Umgebungsbedingungen herrschen.

Der Anwendungsbereich von Wirbelstromsensoren als Wegmesssensoren ist sehr breit und beinhaltet Abstands- bzw. Exzentrizitätsmessungen an rotierenden Metallwalzen und -scheiben, Messungen von Ventilbewegungen wie Prellen und max. Hub, Rundheitsmessungen an Turbinen-Außenringen, Dickenmessungen von Flachbandmaterialien sowie Kippwinkel-, Parallelitäts-, Geradheits- und Ebenheitsmessungen im Allgemeinen (Bild 2.5).



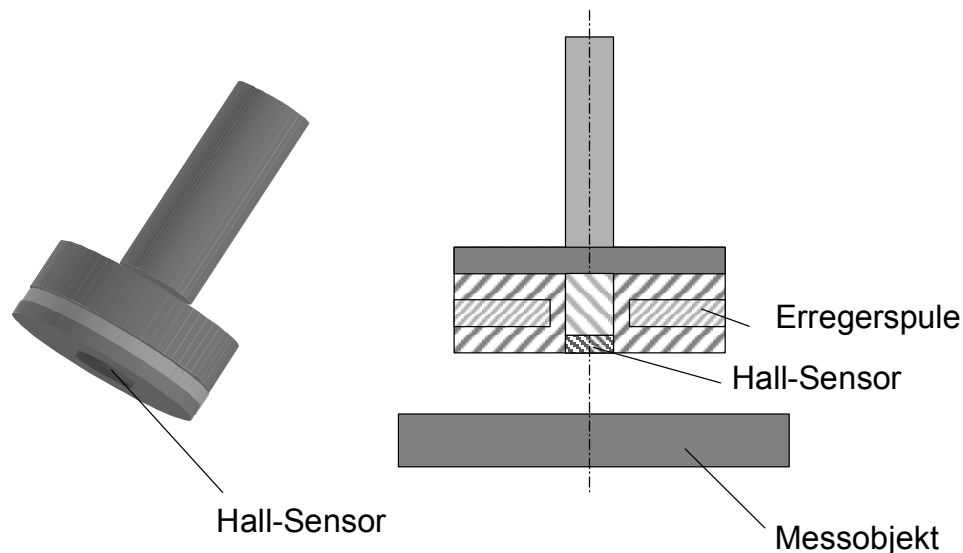
2005 int 5017-006

Bild 2.5: Anwendungsbereiche eines Wirbelstromsensors als Wegmesssensor

2.2.4 Sensierung mittels Feldsensoren

Zur Detektion von Wirbelströmen können neben der Spule auch Elemente wie Hall- und GMR-Sensoren oder SQUIDs verwendet werden [MAY93, RÖP99].

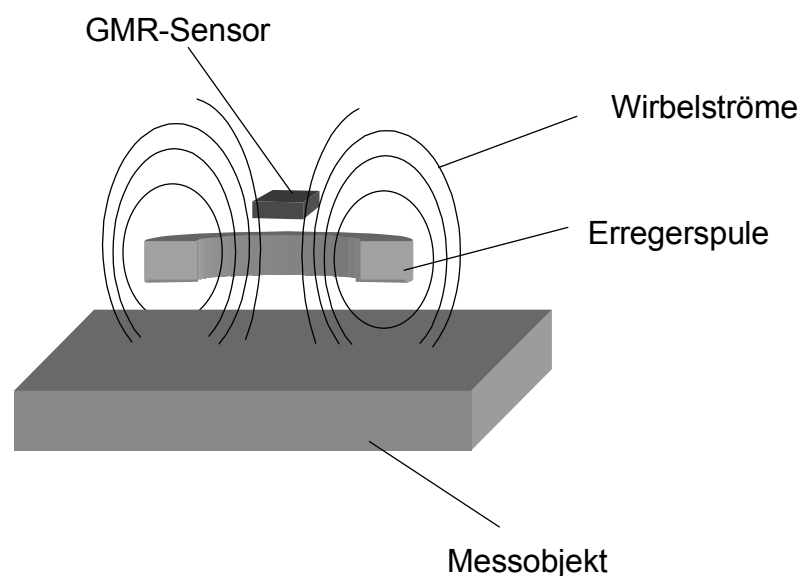
In Bild 2.6 ist die Anwendung eines Hall-Sensors im Wirbelstrommessverfahren schematisch dargestellt [MCM86]. Zur Erzeugung der Wirbelströme im Messobjekt wird eine Erregerspule benötigt. Das resultierende Magnetfeld ergibt sich aus der Überlagerung des Magnetfelds der Erregerspule und der Wirbelströme im Messobjekt [POP01].



2005 int 5017-007

Bild 2.6: Hall-Sensor im Wirbelstrommessverfahren [MCM86]

Eine Anwendung des GMR-Sensors im Bereich des Wirbelstrommessverfahrens ist die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung zur Detektion von Materialfehlern [SMI98]. Dieses Sensorsystem hat den Vorteil, dass die Messung frequenzunabhängig erfolgt und dabei tiefliegende Materialfehler mit geringer Frequenz detektiert werden können.

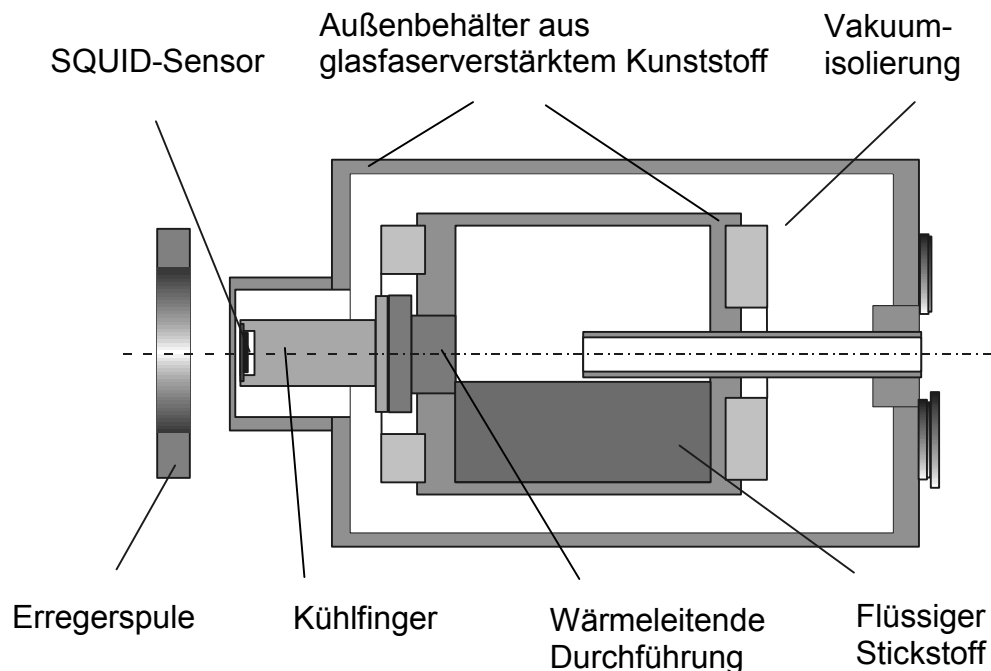


2005 int 5017-008

Bild 2.7: Prinzip eines Wirbelstromsensors mit GMR-Elementen [DOG00]

Ein Wirbelstromsensor mit einer Spule zur Erzeugung des Erregerfeldes und einem GMR-Sensor zur Erfassung des Magnetfeldes wurde von Dogaru et al. [DOG00] vorgestellt. Bild 2.7 zeigt die Prinzipskizze. Die Erregerspule ist dabei so positioniert, dass die Richtung ihres Magnetfeldes nicht in die sensierende Richtung des GMR-Sensors zeigt. Dies hat den Vorteil, dass nur das Magnetfeld der Wirbelströme im Messobjekt gemessen wird.

Supraleitende Quanten-Interferenz-Detektoren (SQUID) sind die empfindlichsten, heute verfügbaren Detektoren für magnetische Felder. SQUIDs beruhen auf dem physikalischen Effekt der Supraleitung, d.h. der verlustlosen Leitung von Strom (elektrischer Widerstand = 0) und der Verdrängung von Magnetfeldern aus dem Supraleiter. Sie haben bis zu sehr niedrigen Frequenzen eine gleichbleibend hohe Empfindlichkeit und gleichzeitig eine sehr gute Ortsauflösung.

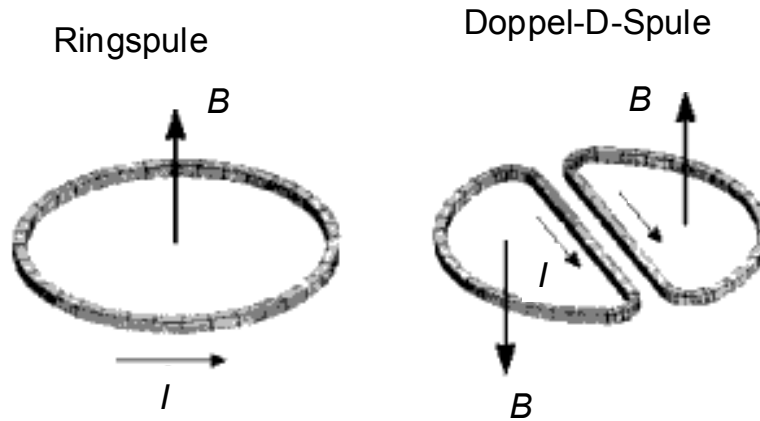


2005 int 5017-009

Bild 2.8: Lageunabhängiger Kryostat zur SQUID-Kühlung [BIN96]

Damit ist es möglich, kleinere Schäden in größerer Materialtiefe zu entdecken. Den Vorteilen der SQUIDs hinsichtlich der Empfindlichkeit und Ortsauflösung stehen einige Nachteile gegenüber. Sie müssen auf tiefe Temperaturen (etwa 4 K für SQUIDs aus herkömmlichen Supraleitern und etwa 77 K für SQUIDs aus Hochtemperatursupraleitern) gekühlt werden (Bild 2.8) und registrieren, auf Grund ihrer hohen Empfindlichkeit, magnetische Störfelder in der Umgebung [WRO04]. Starke Magnetfelder am Ort des SQUID sind zu vermeiden, da sie die Funktion des SQUID beeinträchtigen.

Zur Erregung der Wirbelströme kommen einerseits Ringspulen, andererseits Doppel-D Spulen mit zwei nebeneinander angeordneten Spulen, die von Strömen entgegengesetzten Drehsinns durchflossen werden, zum Einsatz (Bild 2.9).



2005 int 5017-010

Bild 2.9: Konzepte für SQUID-Wirbelstrom-Anregung [KLE99]

Eine D-förmige Spule erzeugt ein Gradientenfeld, während die Ringspule ein "absolutes" Feld erzeugt. Als SQUID-Sensoren können Magnetometer oder Gradiometer verwendet werden, die Messungen in einem Meßsystem in unabgeschirmter Umgebung ermöglichen. Dabei werden sowohl Gleich- und Wechselstromverteilungen wie auch permanente Magnetisierungen an Messobjekten untersucht.

2.3 Messungen mit Wirbelstromsensoren

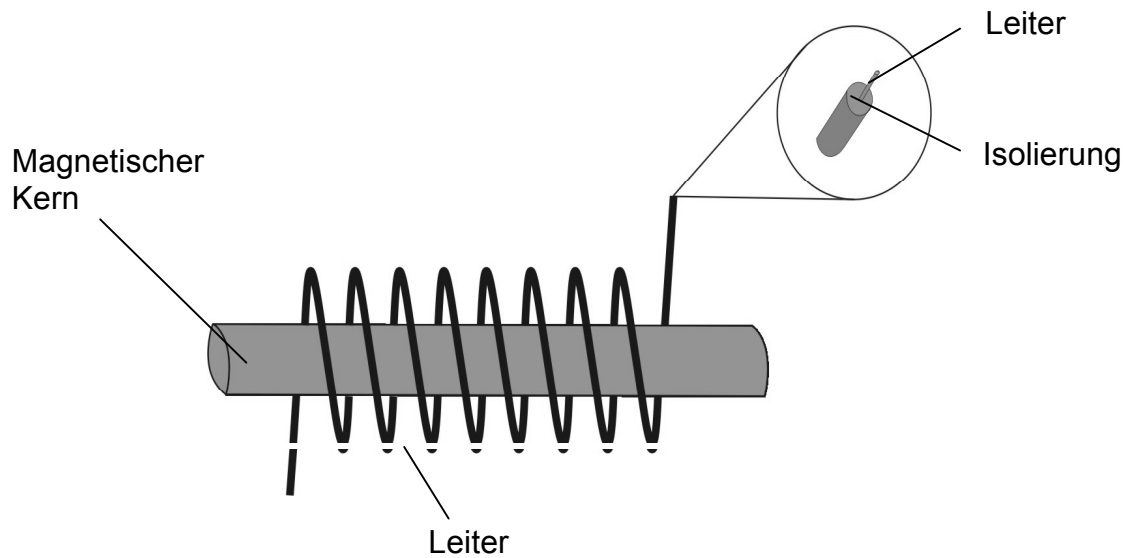
2.3.1 Induktive Messaufnehmer

Induktive Messaufnehmer nutzen die Änderung der physikalischen Eigenschaften eines Prüfobjektes unter Einbringung eines magnetischen Wechselfeldes. Die Änderungen werden durch Wirbelstromverluste in leitfähigen Objekten hervorgerufen. Diese Verluste sind von der Lage und dem Abstand zwischen Sensor und Messobjekt sowie von der Objektgröße und den Materialeigenschaften des Prüfobjektes abhängig.

Bei den Messungen mit induktiven Messaufnehmern ist es möglich, auch nichtleitende Materialien, z.B. Graphit, zu untersuchen oder nachzuweisen [SCH89]. Bei diesem Verfahren können sowohl unbewegte als auch bewegte Objekte untersucht werden. Darüber hinaus sind Messungen bei diesen Verfahren nicht nur punktuell, sondern flächendeckend integriert.

Ein großer Vorteil induktiver Messaufnehmer besteht darin, dass Rückwirkungen weder Erwärmungen noch magnetische Wirkungen im Prüfobjekt erzeugen. Deshalb kann der induktive Sensor mit geringerer elektrischer Leistung betrieben werden.

Konventionell hergestellte induktive Messaufnehmer bestehen im Wesentlichen aus einem magnetischen Kern, einem Leiter und Isolierung (Bild 2.10). Der Magnetkern dient zur Flussführung und zur Konzentration von Strömen. Das Kernmaterial und die Bauteilform haben die Aufgabe, Feldverluste während des Magnetisierungsprozesses möglichst gering zu halten. Die Kernform und die Abmessungen sollten so gewählt sein, dass der Werkstoff bei der Messung die Sättigungsmagnetisierung nicht erreicht und seine magnetischen Eigenschaften bei der Hochfrequenzmessung erhalten bleiben.



2005 int 5017-011

Bild 2.10: Vereinfachte Darstellung eines induktiven Messaufnehmers

Die Spule dient zur Erzeugung und Messung von magnetischen Feldern. Die Stärke der erzeugten magnetischen Felder ist von der Stärke des erregenden elektrischen Stroms abhängig. Während des Herstellungsprozesses ist es wichtig, bei minimaler Dicke des Isolators einen maximalen Isolationswiderstand zu erreichen. Durch die Auswahl von Materialien mit niedrigen Dielektrizitätskonstanten ist die Reduzierung von potenziell entstehenden parasitären Kapazitäten möglich.

2.3.2 Prüfspulenarten

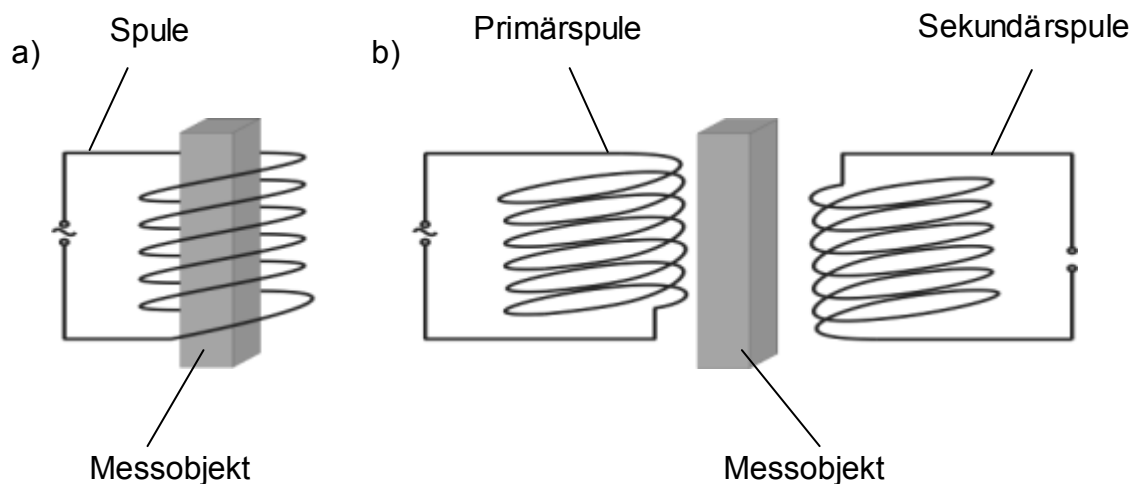
Das Wirbelstrommessverfahren basiert auf der Verwendung einer, zweier (Erregerspule und Messspule) oder mehreren Spulen, die aus einer oder mehreren Wicklungen bestehen. In Abhängigkeit von der Aufgabenstellung werden unterschiedliche Spulenarten verwendet.

Bei den heutzutage existierenden Wirbelstromprüfverfahren haben sich mehrere Arten von Prüfspulen als nützlich erwiesen. Dazu gehören Durchlaufspulen unterschiedlicher Ausführung, Tastspulen, Gabelspulen und zwei Typen von Innenspulen [SCH91].

Den einfachsten Aufbau hat die Durchlaufspule. Es handelt sich dabei um eine Zylinderspule mit nur einer Wicklung, durch die das Messobjekt hindurchgeführt wird.

Dabei ändert sich der Scheinwiderstand der Spule (Bild 2.11.a). Durchlaufspulen werden überwiegend für Schichtdickenmessungen eingesetzt.

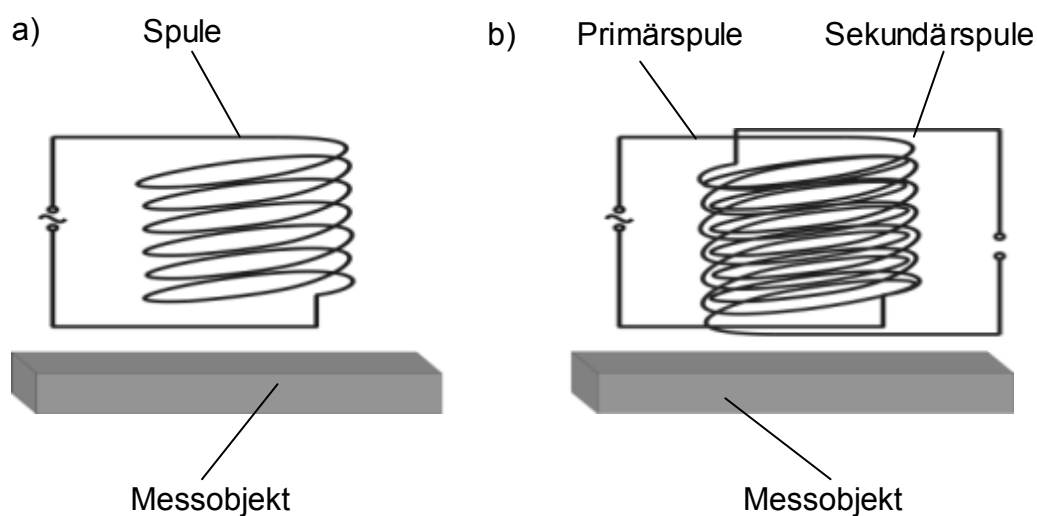
Bei einer Durchlaufspule vom Transformatortyp erzeugt die Primärspule ein Magnetfeld im Bereich der Sekundärspule, wo sich auch das Prüfobjekt befindet. In diesem Fall tritt eine Spannung am Ausgang der Sekundärspule auf, die erfasst werden kann. Das Messobjekt wird hier als Spulenkern eingesetzt.



2005 int 5017-012

Bild 2.11: Durchlaufspulen bei der Wirbelstrommessung a) Durchlaufspule vom Parametertyp, b) Durchlaufspule vom Transformatortyp

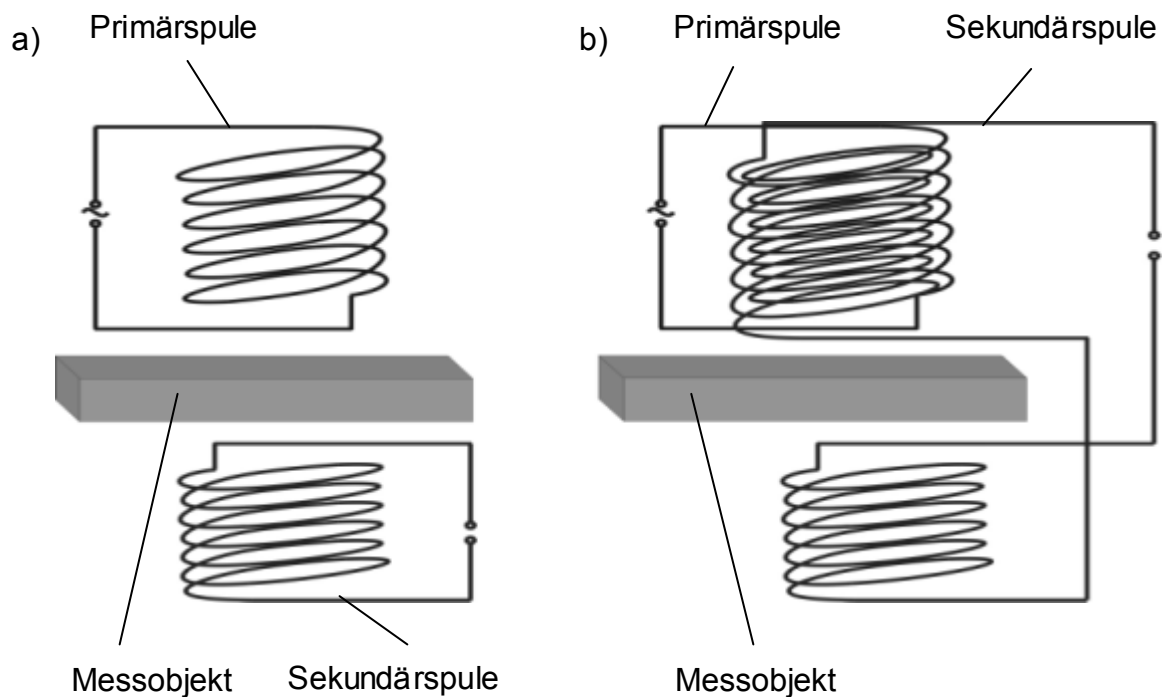
Das Messergebnis wird nicht nur durch die Eigenschaften des Prüfobjektes beeinflusst, sondern auch durch die Spulenabmessungen und die Windungszahl der Sekundärspule (Bild 2.11.b).



2005 int 5017-013

Bild 2.12: Tastspulen bei der Wirbelstrommessung a) Tastspule vom Parametertyp, b) Tastspule vom Transformatortyp

Die Tastspule vom Parametertyp ist wie die Parameterdurchlaufspule sehr einfach aufgebaut (Bild 2.12.a). Sie wird oft für Schichtdickenmessungen als Koppellement angewendet. Durch einen entsprechenden Aufbau und die Anpassung des Frequenzbereichs können zahlreiche Messaufgaben gelöst werden. Die Tastspule vom Transformatortyp erzeugt mit Hilfe der Primärspule ein magnetisches Wechselfeld. Dieses Feld wird vom Prüfobjekt entsprechend dessen Eigenschaften geändert. Die Sekundärspule wird auf derselben Achse wie der Träger mit der Primärspule positioniert und erfasst diese Änderung des Magnetfeldes in ihrer Ausgangsspannung (Bild 2.12.b).



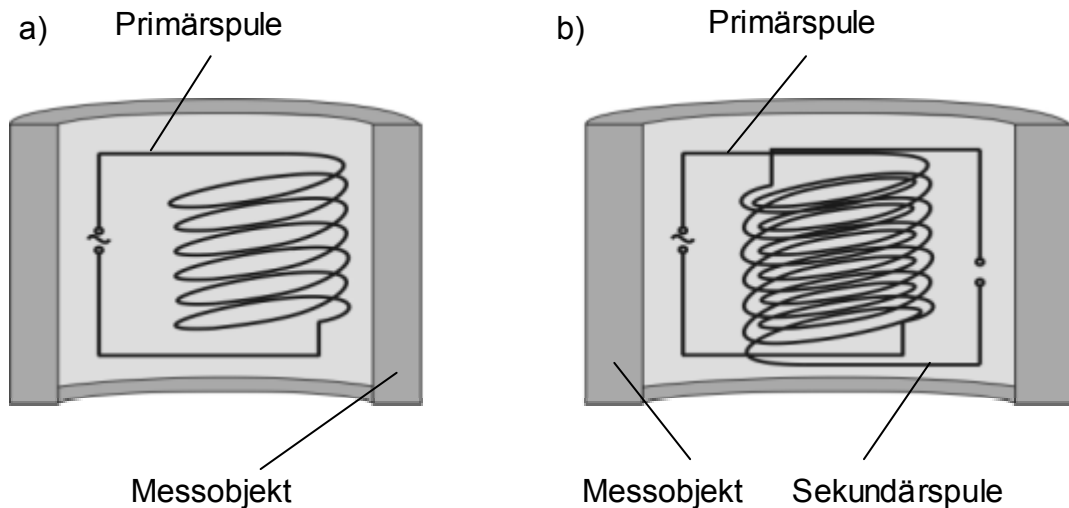
2005 int 5017-014

Bild 2.13: Gabelspulen bei der Wirbelstrommessung a) Gabelspule vom Parametertyp, b) Gabelspule vom Transformatortyp

Die Gabelspule (Bild 2.13.a) ist zum Transformatortyp zu zählen. Die Primär- und Sekundärspulen sind auf denselben Achsen angeordnet, aber auf getrennten Trägern positioniert. Das Messobjekt läuft zwischen beiden Spulen hindurch und schirmt sie dabei gegeneinander ab. Die Sekundärspule misst die unter dem Einfluss des Prüfobjektes geänderte Spannung. Als Variation der Gabelspule kann eine Ausführung mit Kompensationswicklung über der Primärspule betrachtet werden (Bild 2.13.b). In diesem Fall ist die Ausgangsspannung bei fehlendem Prüfobjekt gleich null, und die Empfindlichkeit der Messspule erhöht sich.

Die Innenspule vom Parametertyp stellt eine Spezialausführung der Tastspule dar. Die Zylinderspule wird in einem hohlen Prüfobjekt so positioniert, dass dieses vom magnetischen Feld durchdrungen wird (Bild 2.14.a). Damit besteht eine Analogie zwischen der Durchlaufspule und der Innenspule dieses Typs.

Eine weitere Klassifizierung stellt die Innenspule vom Transformortyp dar. Diese ist der Innenspule vom Parametertyp sehr ähnlich und wird meistens zur Prüfung von Rohren und Hohlräumen herangezogen (Bild 2.14.b). Zudem besteht auch die Möglichkeit, diese Spulen bei der Schichtdickenmessung einzusetzen.



2005 int 5017-015

Bild 2.14: Innenspulen bei der Wirbelstrommessung a) Innenspulen vom Parametertyp, b) Innenspulen vom Transformortyp

Alle genannten Spulentypen lassen sich an Prüfbedingungen und Prüfaufgaben durch Variation von Geometrie und Aufbau anpassen. Die Wechselwirkung zwischen dem Prüfobjekt und den Spulen muss bei solchen Variationen optimiert sein.

2.3.3 Einsatz unterschiedlicher Prüfspulenarten bei der Wirbelstrommessung

Die Anwendungen des Wirbelstromverfahrens sind bei niedrigen Prüffrequenzen prinzipiell auf die Messung der Oberflächen- oder oberflächennahen Fehler, bei höheren Frequenzen auf Abstands- und Schichtdickenmessung beschränkt. Die Spulenart und Anordnung beim Wirbelstrommessverfahren wird in Abhängigkeit vom Prüfobjekt, dem Messabstand und den Arbeitsbedingungen gewählt.

a) Wirbelstrommessung mit Durchlaufspulen

Die Messgeräte mit Durchlaufspulenordnung werden bei der Prüfung von zylindrischen Werkstücken, Rohren und Stäben eingesetzt. Die Spulen werden dabei auf einem meist aus Kunststoff gefertigten Träger aufgebracht [BEC80]. Das Bauteil wird in diesem Fall in den Träger eingeführt.

Bei Bauteilen mit sehr großem Durchmesser wird die Wirbelstromverteilung durch Materialfehler gestört und der Bereich mit ungestörter Wirbelstromverteilung verkleinert sich wesentlich. Dieses führt zu einer fehlerhaften Messung. Auch die Lage des Messobjektes hat einen großen Einfluss auf das Messergebnis. Bei der Vermessung von langen Objekten, wie z.B. Stangen, muss eine geeignete Vorrichtung gebaut werden. Das Gleiche gilt auch für sehr kleine Messteile: Es ist

darauf zu achten, dass die Prüfobjekte immer auf derselben Stelle positioniert werden. Dazu benutzt man eine Schablone, um die richtige Messposition beizubehalten.

b) Wirbelstrommessung mit Gabelspulen

Die Messsensoren mit Gabelspulenanordnung werden überwiegend zur Messung der Materialdicke, einer spezifischen elektrischen Leitfähigkeit und der magnetischen Permeabilität eingesetzt [FÖR54]. Bei dieser Anordnung muss das Messobjekt zwischen der Primär- und Sekundärspule so positioniert sein, dass der Abstand zwischen der Sekundärspule und dem Prüfobjekt kleiner ist als der zur Primärspule. Diese Position erlaubt die Messung der Feldstärke mit hoher Empfindlichkeit. Der Vorteil einer Wirbelstrommessung mit Gabelspulenanordnung besteht darin, dass die Position des Messobjektes zwischen beiden Spulen (bei Sensoren ohne magnetischen Kern) keinen Einfluss auf das Ausgangssignal hat.

Die Ausgangsspannung der Sekundärspule wird durch mehrere Parameter geändert. Dazu gehören nicht nur Materialeigenschaften wie die elektrische Leitfähigkeit, die Permeabilität, die Dicke der Probe und der Abstand zur Sekundärspule, sondern auch Geräteparameter wie die Messfrequenz und das Substratmaterial.

Auch haben sich die Gabelspulengeräte bei der Messung von Folien und Bändern aus Nichteisen-Metallen sehr bewährt. Diese Messgeräte sind sehr geeignet zur Messung und Überwachung von Folien unterschiedlicher Dicke während des Walzprozesses. Die Foliendicke und -toleranz ist je nach Material sehr unterschiedlich. Sie sind bei Al-Folie $5\text{-}200\text{ }\mu\text{m} \pm 10\%$, bei Cu-Folie $75\text{-}150\text{ }\mu\text{m} \pm 2\%$ und bei Gussstücken 3 bis 12 mm Durchmesser.

c) Wirbelstrommessung mit Tastspulen

Prüfgeräte mit Tastspulenanordnung können nur an der Oberfläche eines Prüfobjekts eingesetzt werden [FÖR52]. Bei Verfahren mit Tastspulenanordnung ist nicht nur eine Fehlerprüfung möglich, sondern auch eine Dickenmessung und eine Materialparameterbestimmung. Die grundlegenden Parameter bei diesem Verfahren sind der Aufbau und die elektrischen Eigenschaften der Spulen, die Anordnung der Spulen bezogen auf das Prüfobjekt, die elektrische Schaltung der Spulen und die Zusammenschaltung von Prüfspule und Prüfgerät [PFI92].

Beim Tastspulenverfahren ändern Permeabilität und elektrische Leitfähigkeit des Messobjektes sowie Fehler im Prüfobjekt das magnetische Feld der Messspule. Große Bedeutung haben die Oberflächenform und deren Eigenschaften, die Position der Spule und die Dicke des Prüfobjektes, wenn sie kleiner als die Eindringtiefe des Magnetfeldes ist. Die Messung wird zudem durch die Prüffrequenz, die Spulenform und das angewendete Kernmaterial beeinflusst.

Es ist nicht möglich, das Tastspulenverfahren bei großer Rauheit der Oberfläche, elektrisch nichtleitenden Materialien, hohen Temperaturen und hohen

Prüfgeschwindigkeiten einzusetzen. Ungeeignet ist dieses Verfahren ferner bei Prüfobjekten, die kleiner als die Breite des erzeugten Magnetfeldes sind.

d) Wirbelstrommessung mit Innenspulen

Dieses Verfahren ist geeignet für die Vermessung von Innenwänden sehr dickwandiger Rohre. Die Spulen werden meistens koaxial zum Rohr positioniert. Es ist auch möglich, Innenspulen als Tastspulen in der radialen Richtung des Rohrs anzuwenden. Innenspulenverfahren ermöglichen nicht nur die Wändevermessung bei Rohren, sondern auch die Schichtdickenmessung.

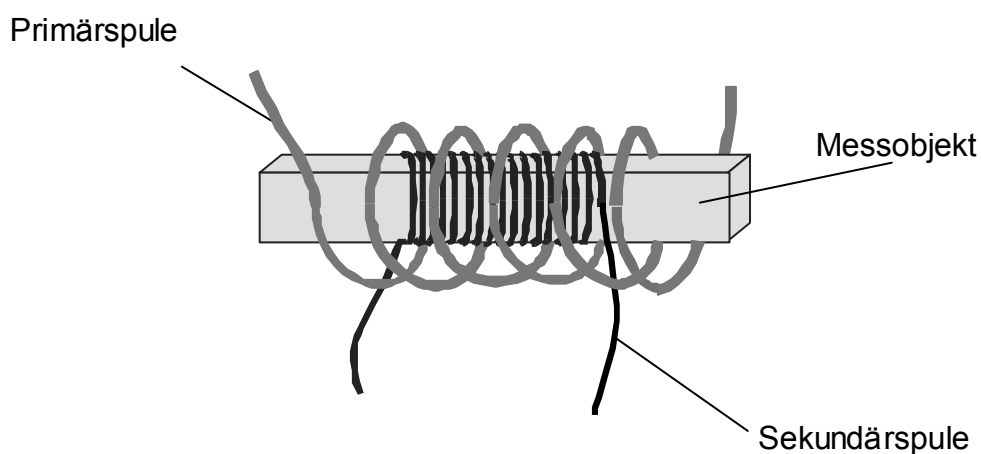
Das Messergebnis resultiert aus dem Durchmesser der Bohrung oder dem Rohrrinnendurchmesser. Im Fall von Rohren mit einer Wanddicke, die kleiner ist als die Eindringtiefe des Magnetfeldes, beeinflusst auch die Wandstärke das Messergebnis.

2.3.4 Prüfspulenanordnungen

Nach der Lage des Sensors bezüglich des Prüfobjektes und unter Berücksichtigung der vorliegenden Prüfaufgaben sowie der Erhöhung der Empfindlichkeit werden folgende Anordnungen und Verfahren unterschieden:

a) Absolutverfahren

Bei den Absolutverfahren wird der Absolutwert des Scheinwiderstandes der Prüfspule oder die in der Messspule induzierte Spannung gemessen. Wird das Prüfobjekt durch die Spule geschoben (Bild 2.15), ändert sich die Messspannung an der Spule bzw. der Scheinwiderstand.



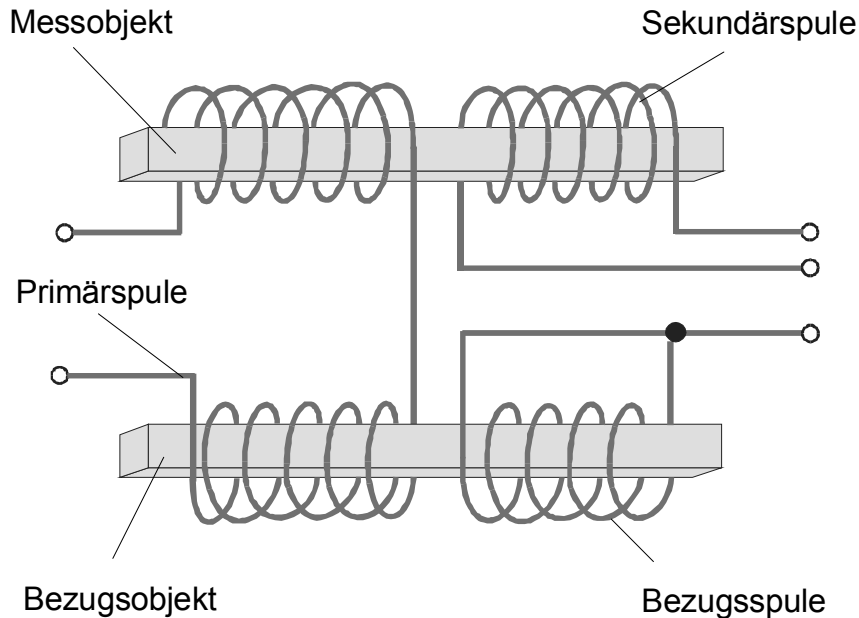
2005 lmt 5017-016

Bild 2.15: Spulenanordnung beim Absolutverfahren

Das Absolutverfahren ist nur zur Vermessung von Proben mit großen Unterschieden in ihren Materialeigenschaften geeignet, weil die gemessenen Absolutwerte bei diesem Verfahren um ca. 1% schwanken.

b) Vergleichsverfahren

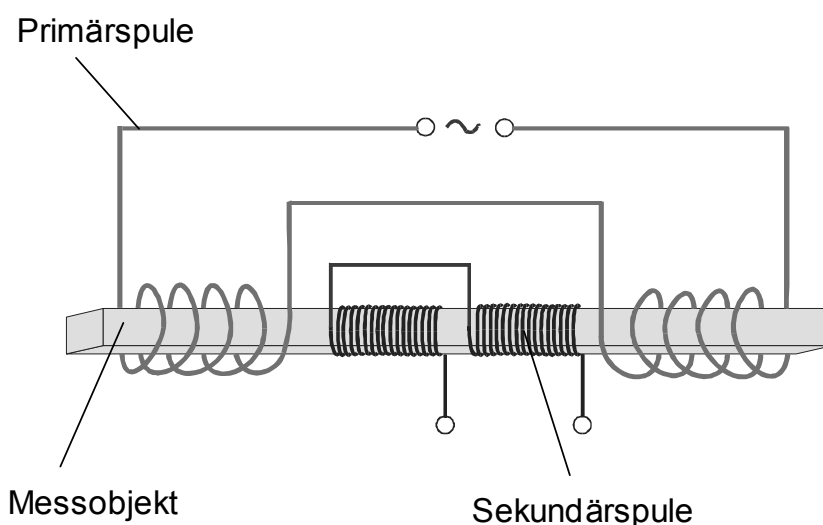
Bei der Messung von Änderungen der Materialeigenschaften werden Vergleichsverfahren eingesetzt. Bei diesen Verfahren werden zwei identische Spulen verwendet, die gegeneinander geschaltet sind (Bild 2.16). Um ein reproduzierbares Messergebnis zu bekommen, wird stets dieselbe Spule als Bezugsspule verwendet.



2005 int 5017-017

Bild 2.16: Spulenanordnung bei den Vergleichsverfahren

Wenn zwei Proben in die Prüfspule und die Bezugsspule eingebracht werden und deren Eigenschaften übereinstimmen, ist die angezeigte Spannungsdifferenz gleich null. Wird dagegen die Prüfspule mit einer Probe mit anderen Eigenschaften versehen, wird eine Spannungsdifferenz angezeigt. Bei geeigneten Geräten mit hoher Messempfindlichkeit ist es möglich, eine Differenz von schon 1% zu messen. Bei dieser Messung können, aufgrund einer Erwärmung in der Bezugsspule, während der Messung Fehler im Messergebnis auftreten.



2005 int 5017-018

Bild 2.17: Spulenanordnung beim Selbstvergleichsverfahren

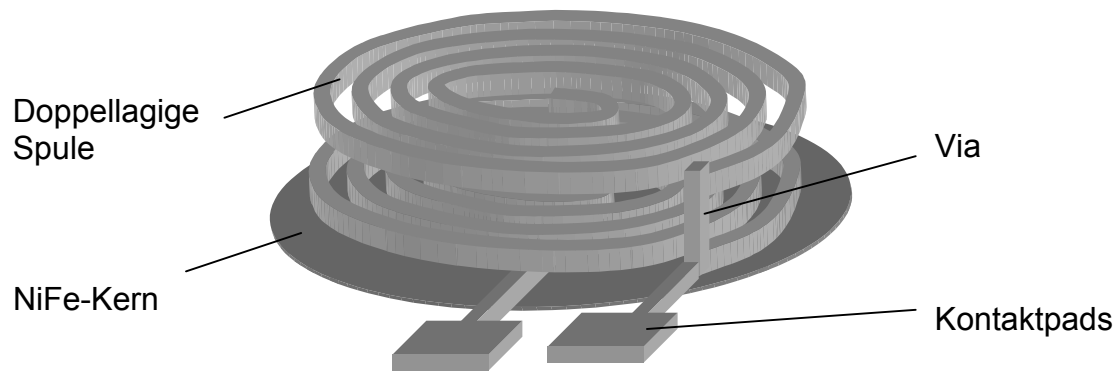
Die Messung von Materialfehlern ist beim Absolut- oder Vergleichsverfahren nicht möglich. Daher wird bei der Fehlerprüfung von Stangen und Rohren ein Selbstvergleichsverfahren verwendet. Bei gleicher Spulenordnung wie im Vergleichsverfahren werden im Selbstvergleichsverfahren beide Spulen in einer zum Prüfobjekt nur geringen Entfernung positioniert (Bild 2.17). Die Probe wird bei diesem Verfahren mit sich selbst verglichen. Innerhalb des geringen gewählten Abstands variieren die Werte der Legierung und des Gefüges nicht wesentlich, sodass Materialfehler gemessen werden können.

Der Nachteil dieses Verfahrens besteht darin, dass nur Fehler gemessen werden können, die in beiden Prüfspulen gleicher Ausdehnung und Form detektiert werden. In beiden Spulen sollte sich die gleiche Wirbelstromverteilung ausbilden. Die induzierte Spannung in gegeneinander geschalteten Messspulen kompensiert sich, infolge der gleichen Größe der Spulen und der Phasenverschiebung, um 180° . Bei der Messung ist es erforderlich, den Abstand zwischen den Spulen möglichst groß zu halten, um einen höheren Messwert der Permeabilitäts- und Abmessungsschwankungen des Prüfobjektes zu bekommen.

2.3.5 Wirbelstromsensoren in der Mikrotechnik

Neuere industrielle Anwendungen von Wirbelstromsensoren erfordern heutzutage eine sehr hohe Auflösung. Diese Forderungen können durch eine Verkleinerung des Sensors erreicht werden. Die Miniaturisierung des Wirbelstromsensors gelingt durch die Verwendung neuer Technologien und Fertigungsverfahren [MEN97]. Die Weiterentwicklung offenbart sich in der Senkung der Herstellungsprozesskosten, der Erhöhung der Stückzahl von Bauteilen, der Verbesserung der Systemfunktionen und ihrer Zuverlässigkeit. Der Übergang zur Dünnschichttechnik ermöglicht die Herstellung des Wirbelstromsensors mit feinen, planaren Spulen mit kleinem Abstand zwischen den Windungen.

Unterschiedliche Wirbelstromsensoren wurden bereits in der Mikrotechnologie realisiert. Bei der Entwicklung des Gesamtprozesses ist auf die Prozesskompatibilität der mikrotechnischen Einzelprozesse sowie auf die Wechselwirkung der verwendeten Funktionsschichten zu achten. Dabei wurden mehrere Designs entworfen. Diese Designs unterscheiden sich nicht nur durch das Fehlen bzw. Vorhandensein eines magnetischen Kerns und seine Form, sondern auch in der Anzahl und Position von Spulen [GRI02, ZMO98]. In Abhängigkeit von der Reihenfolge des Aufbaus und der aufzubringenden Strukturen wurden Glas- oder Siliziumsubstrate verwendet. Die Spulenordnung und -anzahl wurde von zwei bis zehn oder mehr Spulen variiert.

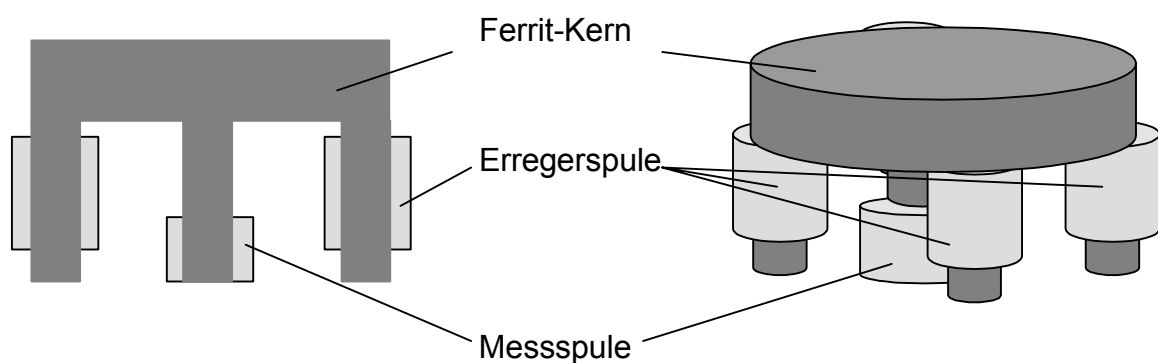


2005 imt 5017-019

Bild 2.18: Zweilagiger Sensoraufbau mit NiFe-Kern [WOG03]

In Bild 2.18 ist ein Wirbelstromsensor mit doppellagigem Spulenaufbau und einem darunter liegenden magnetischen Kern für die Winkelmessung dargestellt. Dieser Sensor wurde von der Universität Braunschweig entwickelt und ist für die Integration in eine Messvorrichtung vorgesehen.

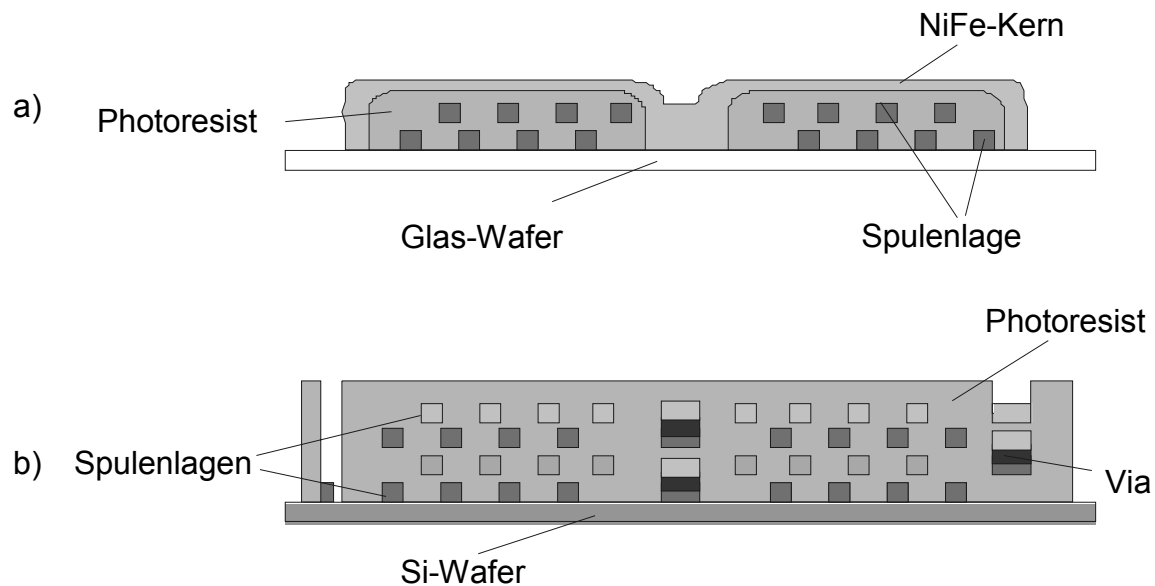
Das Bild 2.19 präsentiert ein Modell des Wirbelstromsensors zum Nachweis von Materialfehlern in leitenden Materialien, das in [CHA03] beschrieben wurde. Die Besonderheit dieses Wirbelstromsensors besteht im Vorhandensein von vier Erregerspulen und einer Messspule. Die Spulen sind auf einem Ferritkern positioniert. Dieser Sensor besitzt eine hohe Empfindlichkeit, besonders für tiefe lokalisierte Fehler und eine gute räumliche Auflösung.



2005 imt 5017-020

Bild: 2.19: 2D- und 3D-Darstellung eines Wirbelstromsensors mit vier Erregerspulen

Ein in Dünnschichttechnik gefertigter Wirbelstromsensor wird auch in [SAD01] und [HAM95] vorgestellt. In diesem Fall wurden Substrate aus Glas [SAD01] und Silizium [HAM95] verwendet. Beide Varianten der Sensoren haben Spiralspulen (Erreger- und Messspule), die übereinander positioniert sind. Die erste Variante des Sensors besitzt nur zwei Spulenlagen, die zweite Variante vier Lagen.



2005 imt 5017-021

Bild 2.20: Wirbelstromsensoren in Dünnschichttechnik: [SAD01, HAM95]

Der Unterschied zwischen beiden Aufbauten besteht nicht nur in den unterschiedlichen Abmessungen und der Zahl der Spulenlagen, sondern auch im Vorhandensein eines magnetischen Kerns. Während in Bild 2.20.a ein Nickel-Eisen-Kern integriert ist, ist in den Spulenstrukturen in Bild 2.20.b kein magnetischer Kern vorhanden. Daraus folgen auch die unterschiedlichen Anwendungsbereiche der vorgestellten Sensoren. Zum Beispiel wird der Wirbelstromsensor mit magnetischem Kern für die berührungslose Erfassung von Rissen auf Objektoberflächen leitender Materialien entwickelt. Die Variation des Wirbelstromsensors in Dünnschichttechnik ohne magnetischen Kern wird bei der berührungslosen Messung von Gasleitungen mit kleinem Durchmesser (kleiner als 20 mm) eingesetzt.

2.4 Sensorwerkstoffe

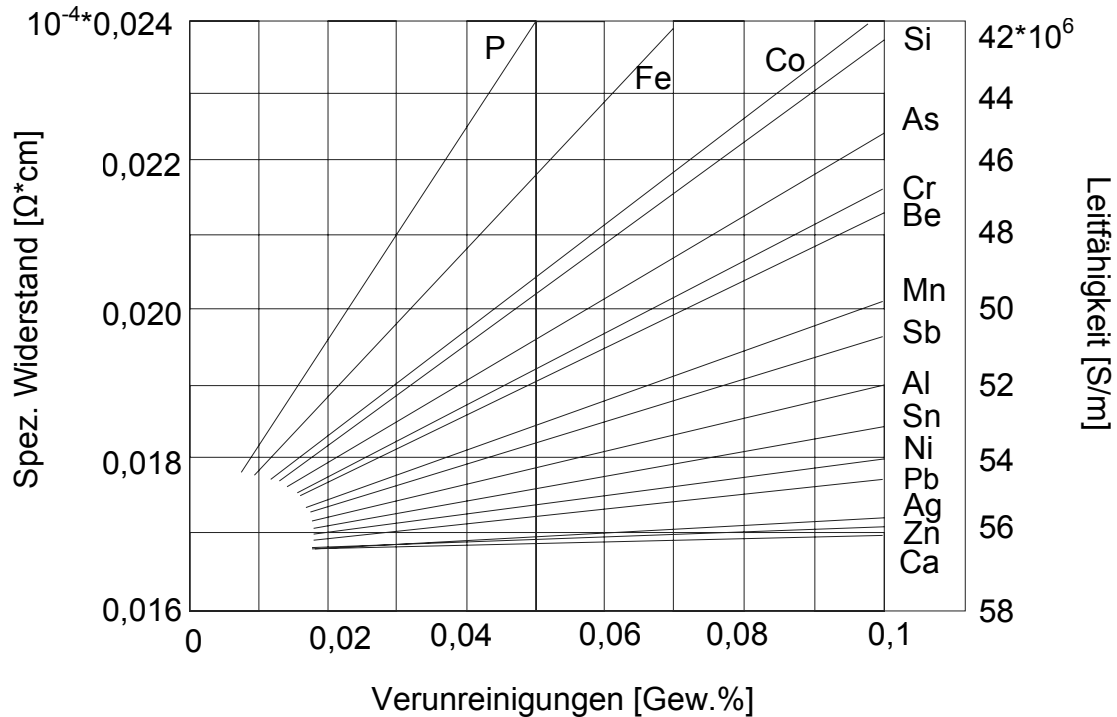
2.4.1 Leiterwerkstoffe für den Spulenaufbau

In diesem Kapitel werden die in der Mikrotechnologie eingesetzten Leiterwerkstoffe vorgestellt. Aus Tabelle 2.1 kann man ablesen, dass Kupfer das am besten leitende Material für die Spulherstellung ist.

Tabelle 2.1: Leitfähigkeit reiner Metalle

Werkstoff	Leitfähigkeit [S/m]
Kupfer	$> 57 \cdot 10^6$
Gold	$46 \cdot 10^6$
Nickel	$14 \cdot 10^6$

Gute Leitfähigkeit, relativ hohe Korrosionsbeständigkeit, gute Lötbarkeit und seine Verfügbarkeit machen Kupfer zum am weitesten verbreiteten und wichtigsten Material in der Elektrotechnik. Kleinste Verunreinigungen (geringer als 0,01%) können die Leitfähigkeit von Kupfer merklich verschlechtern. In der Elektrotechnik ist es üblich, die Leitfähigkeit als Reinheitsgrad anstelle der Analyse und des Prozentgehalts von Fremdstoffen zu verwenden [GUI83].



2005 int 5017-022

Bild 2.21: Einfluss von Fremdelementen auf den spez. Widerstand bzw. die Leitfähigkeit von Kupfer [RAC85]

Bild 2.21 zeigt den Einfluss unterschiedlicher Verunreinigungen auf die Leitfähigkeit von Kupfer. Bei Kaltverformung nimmt der Wert der Leitfähigkeit außerdem ab. Dieser Wert wird sehr stark von der Temperatur beeinflusst und nimmt mit ansteigender Temperatur zu. In der Luftatmosphäre bildet sich schon bei Raumtemperatur auf der Kuperoberfläche eine Oxidschicht aus, die das Volumenmaterial vor weiteren chemischen Eingriffen schützt und sich nach einer Beschädigung oder Entfernung erneuert.

Ein weiteres wichtiges Material für die Leiterherstellung ist Aluminium. Die Leitfähigkeit von Aluminium beträgt nur ca. 63% derjenigen von Kupfer, liegt jedoch noch deutlich höher als bei anderen Materialien (ausgenommen Silber und Gold). Den breiten Anwendungsbereich verdankt das Aluminium seiner niedrigen Dichte von $2,7 \text{ g/cm}^3$ und seiner guten Leitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit gegen atmosphärischen Einfluss (wie Sauerstoff und Luftfeuchtigkeit). Allerdings sind Leitfähigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Kaltverformbarkeit, wie bei Kupfer, sehr stark vom Reinheitsgrad des Aluminiums abhängig.

Beim Einsatz von Leitermaterialien in der Mikrotechnologie müssen unterschiedliche Aspekte berücksichtigt werden. Alle Materialien sollten sich durch mikrotechnologische Prozesse abscheiden und strukturieren lassen. Im Bereich dünner Filme entstehen Wechselwirkungen wie z.B. Schichtspannungen zwischen den Leiterwerkstoffen und anderen Funktionsschichten, was zur Änderung der Materialeigenschaften führt. Zudem ist in der Mikrotechnologie die Möglichkeit zur Kontaktierung sehr wichtig. Dies bedeutet, dass das leitende Material für die Anschluss pads mit ausgewählten Kontaktierungsmaterialien verbunden wird. Aus diesen Gründen werden im Mikrotechnologiebereich für den Spulenaufbau am häufigsten Gold und Kupfer eingesetzt. Diese Wahl begründet sich außerdem darin, dass sich diese Elemente leicht galvanisch abscheiden lassen.

2.4.2 Isolationsmaterialien

2.4.2.1 Anorganische Isolationsmaterialien

Als Isolationswerkstoffe können sowohl organische als auch anorganische Dielektrika dienen. In mikrotechnologischen Prozessen sind vorwiegend anorganische Werkstoffe als Isolationsschichten verbreitet. Zur Herstellung von Isolationsschichten werden hier Siliziumdioxid (SiO_2), Siliziumnitrid (Si_3N_4) und Aluminiumoxid (Al_2O_3) verwendet [HOP98]. In Tabelle 2.2 sind einige Eigenschaften dieser drei Isolationsmaterialien gegenübergestellt. Siliziumdioxid wird unter anderem durch thermische Oxidation von Silizium bei 1.000°C hergestellt. Auch ist es möglich, Siliziumdioxid durch CVD-Prozesse oder reaktive Kathodenzerstäubung abzuscheiden.

Tabelle 2.2: Physikalische Eigenschaften ausgewählter Isolationsmaterialien [RUG84]

Eigenschaften	SiO_2	Si_3N_4	Al_2O_3
Spezifischer Widerstand [Ωcm]	>1.016	1.007	>1.016
Therm. Leitfähigkeit [W/cmK]	0,14	0,185	0,17
Therm. Ausdehnungskoeff. [10^{-6}K^{-1}]	0,5	2,8	7,0
Schmelzpunkt [$^\circ\text{C}$]	ca. 1.700	ca. 1.900	ca. 2.000
relative Dielektrizitätskonstante	3,9	7,5	9,0
Durchbruchfeldstärke [V/cm]	$6 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6 - 10^7$
Dichte [g/cm^3]	2,65	3,44	2,4
Bandlücke [eV]	8,9	5,1	8,7

Siliziumnitrid- und Aluminiumoxidschichten werden ausschließlich durch Kathodenzerstäubung hergestellt. Die Abscheidung von Aluminiumoxid ist auch unter Verwendung von Aluminiumtargets in einer Sauerstoffatmosphäre möglich.

Aluminiumoxid weist ionische Bindungen auf, ist thermisch beständig und besitzt vor allem gute Isolationseigenschaften. Neben dem hohen Widerstand ist Aluminiumoxid durch eine hohe Durchbruchfeldstärke gekennzeichnet. Der Nachteil besteht lediglich darin, dass die relative Dielektrizitätskonstante von Aluminiumoxid um den Faktor 2,3 größer ist als die von Siliziumoxid und immerhin um den Faktor 1,2 über dem von Siliziumnitrid liegt [BER89].

Alle vorgestellten Materialien haben einen Schmelzpunkt oberhalb 1.600°C und gleich große spezifische Widerstände. Bei der Verwendung von Isolatoren im Sensorikbereich ist ferner der Ausdehnungskoeffizient sehr wichtig. Der thermische Ausdehnungskoeffizient von Aluminiumoxid ist mehr als doppelt so groß wie der von Siliziumnitrid.

Im Bereich von Schreib-Lese-Köpfen werden für die Herstellung des Schreib-Lese-Spalts parallel anorganische und organische Isolationsmaterialien eingesetzt, wobei Aluminiumoxid vor allen anderen Materialien der Vorzug gegeben wird [FON90]. Für die Spulenisolierung werden auch Siliziumdioxid, Siliziumcarbid oder Siliziumnitrid verwendet. Aluminiumoxid wird aufgrund seiner guten dielektrischen, mechanischen und wärmeleitenden Eigenschaften sehr oft auch als Substratwerkstoff eingesetzt.

2.4.2.2 Organische Isolationsmaterialien

Organische Isolationsmaterialien kommen zum Einsatz, wenn sich die Materialien durch photolithographische oder röntgenlithographische Prozesse strukturieren lassen. Den breitesten Anwendungsbereich finden organische Isolationsmaterialien bei der Herstellung von dünnfilmtechnischen Schreib-Lese-Köpfen. Romankiv et al. beschreiben die Vorteile des Einsatzes von Photoresist gegenüber der Verwendung anorganischer Isolatoren bei der Herstellung von Dünnfilmköpfen [ROM80].

Der Einsatz von Photoresists verringert die Komplexität der Prozessfolge, da aufwändige Sputter-, Ätz- oder Lift-off-Prozesse zum Beschichten und Strukturieren der anorganischen Isolatoren durch Aufschleudern und photolithographische Strukturierung ersetzt werden können [ABR94, HAN88]. Photoresist wird im Bereich von mikrotechnologischen Prozessen überwiegend durch Aufschleudern auf das Substrat aufgebracht, was Kosten und Zeitaufwand des Prozesses reduziert [BRÜ01]. Church sowie Umesaki et al. beschreiben in ihren Publikationen den Einsatz von gehärtetem Photoresist zur Isolation von Spulen [CHU87, UME91].

Vor dem Belackten auf dem Wafer vorhandene Stufen oder Strukturen werden durch das Aufschleudern des Photoresists weitergehend eingeebnet. Für den Einsatz in der Photolithographie hat dieser Effekt eine große Bedeutung. Bei ebenen

Oberflächen wird beim Aufschleudern eine gleichmäßige Photoresistschicht hergestellt. Eine Überhöhung der Photoresistschicht am Rand des Wafers kann man durch abgerundete Ränder verhindern [WID88].

Bei der Thermobehandlung von Photoresist werden mehrere Temperaturbereiche unterschieden, die abhängig vom Ablauf unterschiedlicher chemischer Reaktionen sind. Bild 2.22 stellt die Temperaturbereiche für Reaktionsvorgänge einzelner Komponenten eines Photoresists dar. Ein Photoresist enthält grundsätzlich drei Bestandteile: ein Harz (Novolack), eine photoreaktive Komponente (PAK) und ein Lösungsmittel (z.B. Methoxypropylazetat). Der Volumenanteil des Harzes im Photolack liegt bei etwa 20%, der Anteil der photoreaktiven Komponente beträgt ca. 10% und der Lösungsmittelanteil ca. 70%.

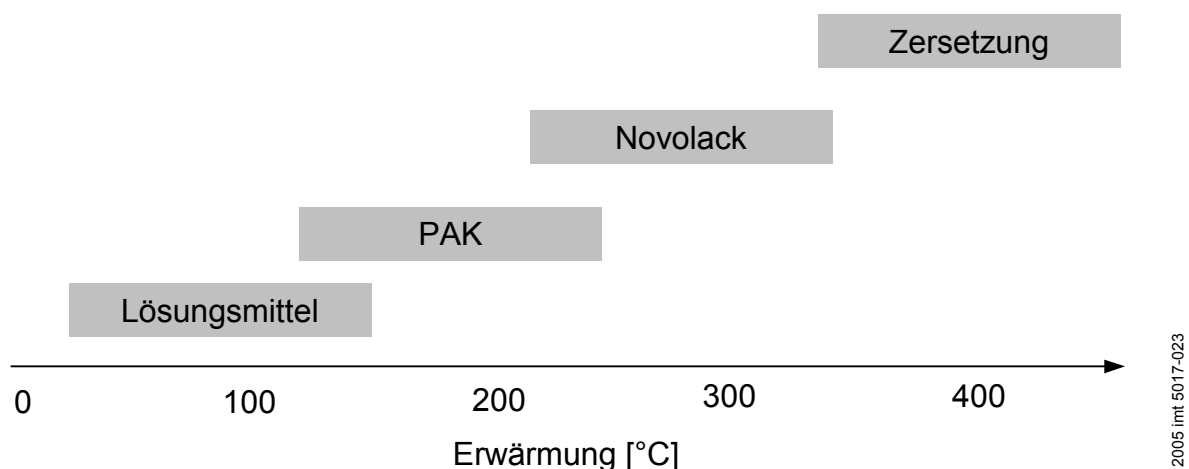
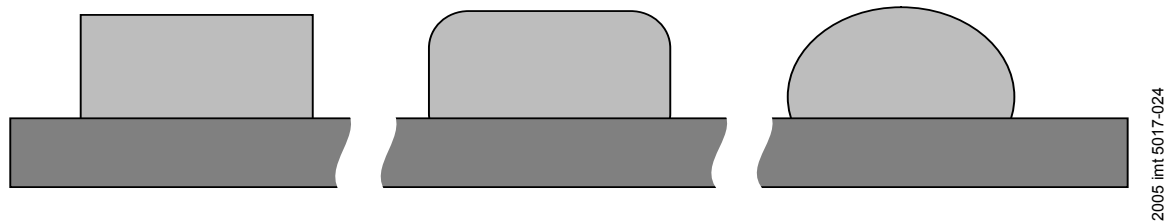


Bild 2.22: Reaktionsbereiche bei der Erwärmung von Photoresists [BER91]

Im Bereich bis 70°C können thermisch bedingte Reaktionen ausgeschlossen werden [JON84]. Zwischen 70°C und 100°C findet eine Änderung der photoresistiven Komponente statt. Im Bereich von 140°C bis zu 300°C finden bereits Reaktionen im Harzanteil statt. In diesem Bereich vernetzt sich der Lack thermisch nach dem vorhergehenden Verflüssigen. Bei der Verflüssigung nimmt der Photoresist eine thermodynamisch günstigere Form an. In der Regel ist dies eine Kugel, die Schichtstrukturen können diese Form jedoch nur näherungsweise erreichen (Bild 2.23). Das Verhalten im Verflüssigungsprozess wird stark von Zusätzen bestimmt, die zur thermischen Stabilisierung des Photoresists beigefügt sind [BER91].

Bei einer Temperaturerhöhung über 200°C treten weitere chemische Reaktionen im bereits vernetzten und gehärteten Novolack auf. Ab 250°C können in der Sauerstoffatmosphäre Oxidationserscheinungen beobachtet werden, die mit dem leichten Anstieg des Molekulargewichts einhergehen. Bei einer Erwärmung oberhalb 300°C beginnt in der Sauerstoffatmosphäre die vollständige Zersetzung des Novolackharzes mit intensiver Ausgasung. Oberhalb von 600°C werden weitere Stoffe wie Wasser, Kohlendioxid, Phenol und Methan freigesetzt [KNO85, MOR86, CAS93].



2005 int 5017-024

Bild 2.23: Verflüssigung von Photoresist bei thermischer Behandlung

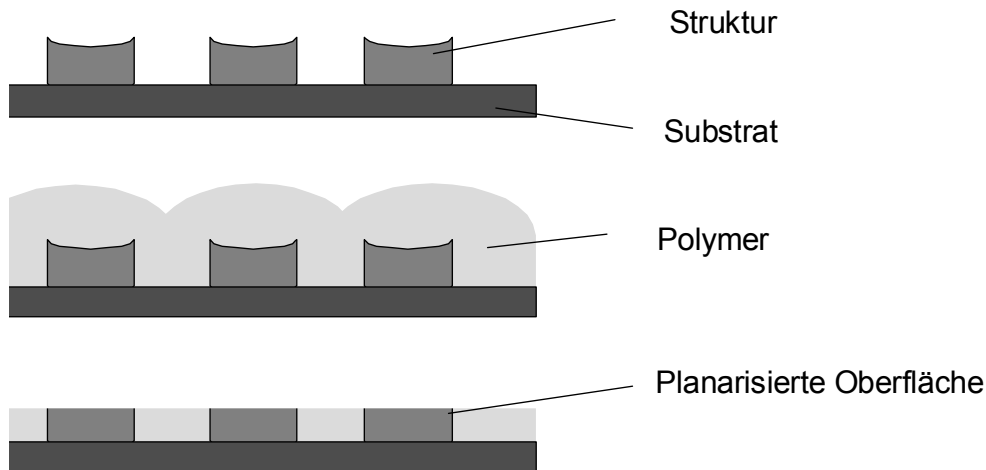
Zunehmende Verbreitung in der Fertigung von Mikrosystemen finden fotoempfindliche Polymere (Photoresists), welche hohe Aspektverhältnisse bei der Lithographie ermöglichen. Diese Aspektverhältnisse können nicht nur mit DNQ/Novolack, sondern auch mit den Photoresists SU-8 (photoempfindliches Epoxiharz) erzielt werden [OBR01]. Während SU-8 nach der lithographischen Strukturierung nicht mehr entfernbar ist, kann das Novolack mit Lösungsmitteln entfernt werden.

SU-8 dient wegen seiner hohen chemischen und mechanischen Widerstandsfähigkeit auch als Werkstoff für den Aufbau von Mikrosystemen [SHA97, CHU98]. Die mechanischen Eigenschaften lassen sich beim SU-8 durch eine Wärmebehandlung beeinflussen. Die Behandlung erfolgt nach der Entwicklung des SU-8 beim photolithographischen Prozess. Aufgrund seiner elektrischen isolierenden Eigenschaften lässt sich SU-8 als Einbettmaterial einsetzen. Ein weiterer Vorteil von SU-8 besteht in der chemischen Inertheit des SU-8, die bei der Oberflächenbearbeitung einen rein mechanischen Abtrag erlaubt.

2.4.2.3 Einsatz von Photolacken in der Mikrotechnologie

Die Verwendung organischer Werkstoffe ist bei der Herstellung von Bauteilen in der Mikrotechnologie von großer Bedeutung (z.B. bei der Herstellung von Schreib-Lese-Köpfen). Die Anwendung von Photoresists im Dünnsfilmbereich hat gegenüber der Anwendung von anorganischen Werkstoffen mehrere Vorteile [ROM80]. Die Komplexität des Herstellungsprozesses zum Aufbringen und Strukturieren des Photoresists verringert sich wesentlich im Vergleich zu Sputter- und Ätzprozessen [KOH02]. Durch einen Planarisierungsprozess ist es möglich, eine ebene Oberfläche herzustellen und die Oberflächenqualität zu erhöhen (Bild 2.24) [STA97].

Die Entwicklung von Isolationswerkstoffen ergibt sich nicht nur aus der Notwendigkeit, die Prozesskosten zu reduzieren, sondern umfasst auch unterschiedliche technische Aufgaben. Mit der Verringerung der Strukturbreite steigen die Anforderungen, die dielektrischen Konstanten den Erfordernissen anzupassen. In diesem Bereich werden große Erwartungen in die Entwicklung von organischen Dielektrika gesetzt.



2005 Imt 5017-025

Bild 2.24: Planarisierung von Photoresist

Ein weiterer Vorteil von organischen Isolationswerkstoffen gegenüber anorganischen besteht in den geringeren Schichtspannungen. Als Nachteil von organischen Werkstoffen können die Absorption von Feuchtigkeit und Ausgasungseffekte während der Thermobehandlung betrachtet werden. Diese beiden Prozesse führen zur Verringerung der Schichthftung und können die Korrosion von benachbarten Strukturen fördern. Kritisch ist die Feuchtigkeitsaufnahme im Photoresist, welche nicht nur zur Korrosion, sondern auch zur Erhöhung der Dielektrizitätskonstanten führt. Weitere Anforderungen sind die Temperaturbeständigkeit und die Löslichkeit der Ausgangsprodukte in Lösungsmitteln.

2.4.3 Magnetkernwerkstoffe

2.4.3.1 Magnetische Grundlagen

Bei magnetischen Werkstoffen ist die magnetische Flussdichte von der erregenden Feldstärke abhängig und wird durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$B = J + \mu_0 \cdot H \quad (2.7)$$

Dabei ist H die erregende Feldstärke, J die Polarisierung, B die Flussdichte und $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/m}$ ein Proportionalitätsfaktor, die sogenannte magnetische Feldkonstante (oder Induktionskonstante). Durch Einführung der absoluten Permeabilität μ erhält man:

$$B = \mu_0 \cdot H \quad (2.8)$$

Im Vakuum gilt der folgende Zusammenhang zwischen Feldstärke und Flussdichte:

$$B = \mu_0 \cdot H \quad (2.9)$$

Die absolute Permeabilität ist gleich dem Produkt aus der werkstoffabhängigen Permeabilitätszahl μ_r und der magnetischen Feldkonstante μ_0 :

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0. \quad (2.10)$$

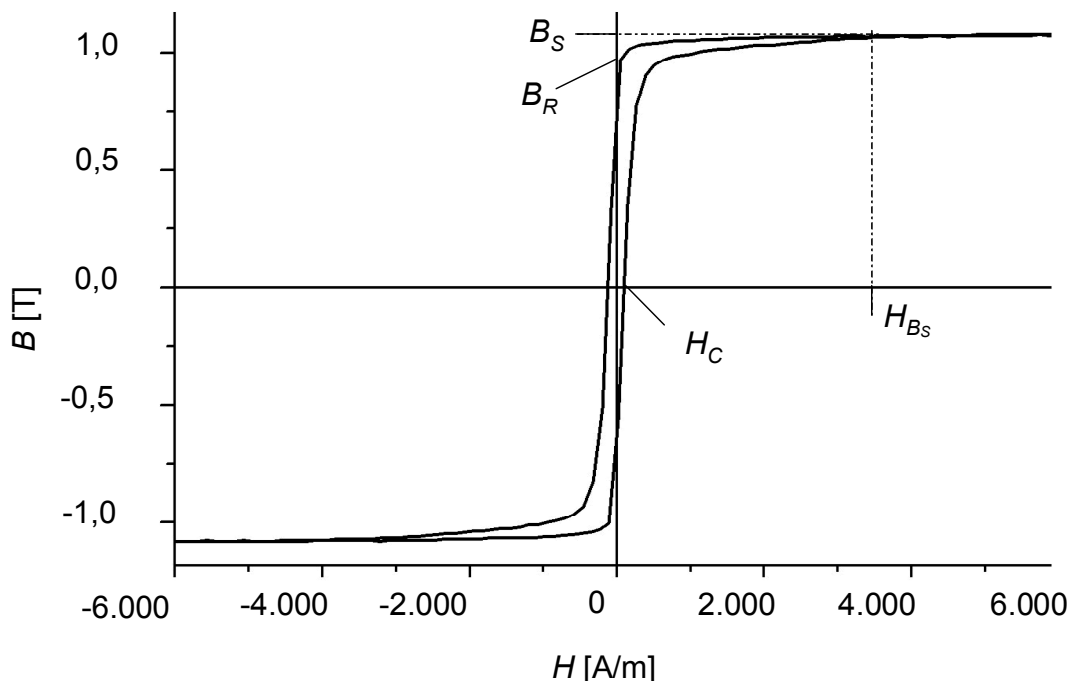
Bei magnetischen Materialien unterscheidet man zwischen hart- und weichmagnetischen. Hartmagnetische Materialien können permanent magnetisiert werden. Weichmagnetische Materialien werden nur unter Einfluss eines äußeren magnetischen Feldes magnetisiert und verlieren ihre magnetischen Eigenschaften ohne das Feld [BOL90].

Bei weichmagnetischen Stoffen sind die magnetische Flussdichte B und die Polarisation J annähernd gleich.

Der magnetische Fluss ϕ berechnet sich aus dem Produkt der Flussdichte B und der entsprechenden Querschnittsfläche A gemäß:

$$\phi = B \cdot A \quad (2.11)$$

Beim Aufbau des Wirbelstromsensors spielen magnetische Eigenschaften des Werkstoffs eine sehr wichtige Rolle. Alle ferromagnetischen Stoffe weisen einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen der Induktion und der Feldstärke auf. Diese Eigenschaften lassen sich aus der Hysteresekurve ermitteln [JIL91].



2005 int 5017-026

Bild 2.25: Typischer Verlauf der Hysteresekurve eines weichmagnetischen Werkstoffes

Bild 2.25 zeigt ein Beispiel für eine Hysteresekurve eines weichmagnetischen Werkstoffes. Diese Kurve beschreibt den Zusammenhang zwischen der magnetischen

Flussdichte und der magnetischen Erregung bei der Magnetisierung eines Materials. Sie ist charakteristisch für den jeweiligen Magnetwerkstoff und stark von den magnetischen Eigenschaften abhängig. Die Werte zur Beschreibung des magnetischen Verhaltens liefern die Schnittpunkte zwischen der geschlossenen Hysteresekurve und den Koordinatenachsen. Der Schnittpunkt von Kurve und Abszisse, die Koerzitivfeldstärke H_C , liefert die Größe eines äußeren Feldes mit entgegengesetzter Polarität, das zum Erreichen eines ummagnetisierten Zustands angelegt werden muss. Der Schnittpunkt der Kurve mit der Ordinate zeigt die Größe der Remanenzflussdichte B_R an und stellt die magnetische Flussdichte dar, die durch das Aufmagnetisieren in einer Richtung im Werkstoff ohne Anlegen eines äußeren Feldes zurückbleibt. Bei hohen Feldstärken erreicht die magnetische Flussdichte einen Sättigungswert, die Sättigungsflussdichte B_S . Die zugehörige Sättigungsfeldstärke wird mit H_{Bs} bezeichnet. Im Zustand der Sättigung sind alle magnetischen Momente der Atome parallel zum Magnetfeld ausgerichtet, so dass die Polarisierung nicht mehr zunehmen kann.

Die Permeabilität des Werkstoffs wird durch das Steigungsverhalten der Kurve beschrieben. Die Anfangspermeabilität μ_{ri} wird durch eine kleine Auslenkung des magnetischen Feldes um den Nullpunkt bestimmt. Die Amplitudenpermeabilität μ_{rA} wird als Quotient aus dem einer bestimmten Feldstärke zugeordneten Flussdichtewert B der Neukurve und der entsprechenden Feldstärke H definiert [MIC95]. Innere Spannungen, Temperaturänderungen, Verformungen und andere Faktoren beeinflussen den Hystereseverlauf derart, dass sie zur Verringerung der Permeabilität und zur Vergrößerung der Koerzitivität führen [CHI64].

2.4.3.2 Magnetische Werkstoffe

Bei der Herstellung von induktiven Messaufnehmern wird ein ferromagnetischer Werkstoff benötigt. Hier unterscheidet man zwischen weichmagnetischen und hartmagnetischen Stoffen [BOL90, RAI99]. Erstere sind für die Kerne geeignet und letztere Permanentmagnete, die leicht magnetisierbar und von sich aus unmagnetisch sein sollen. Je nach Zusammensetzung der Materialien können die Grenzwerte der Koerzitivfeldstärke bei hartmagnetischen Stoffen mehr als 10^6 A/m und bei weichmagnetischen Stoffen 0,4 A/m betragen [HOR95].

Hartmagnetische Werkstoffe finden heutzutage ein breites Anwendungsgebiet. Sie werden beispielsweise zur Herstellung von Permanentmagneten in Lautsprechern, Messinstrumenten, Motoren und magnetischen Kupplungen eingesetzt.

Bei weichmagnetischen Materialien soll die Sättigungsmagnetisierung möglichst hoch liegen [MAL96]. Als kostengünstigstes und weit verbreitetes Material ist Eisen mit hoher Flussdichte (max. 2,15 T) und geringer Koerzitivfeldstärke zu nennen. Weichmagnetische Materialien werden durch ein möglichst hohes und stabiles

Magnetfeld gekennzeichnet und erfordern einen schmalen Luftspalt. Diese Stoffe werden bei der Herstellung von empfindlichen Aufnahmegeräten zur Erfassung von schwachen Signalen sowie von Überträgern, Drosseln und Messwandlern im Bereich kleiner Feldstärken eingesetzt.

2.4.3.3 Magnetkernwerkstoffe in der Dünnschichttechnik

In der Dünnschichttechnik kommen unterschiedliche weichmagnetische Stoffe zur Anwendung. Die wichtigsten Kennwerte für Magnetwerkstoffe sind die Permeabilität, die Koerzitivfeldstärke und die Sättigungsflussdichte. In Abhängigkeit von den gestellten Anforderungen werden Nickel, unterschiedliche Nickel-Eisen-Legierungen, Eisen-Kobalt, Eisen-Silizium-Bor sowie spezielle Eisenlegierungen eingesetzt.

Reines Nickel und Eisen-Kobalt weisen eine hohe Magnetostraktion und Koerzitivfeldstärke auf. Im Gegensatz dazu haben Nickel-Eisen-Legierungen mit hohem Nickelgehalt und Aluminium-Eisen-Silizium-Legierungen eine geringe Magnetostraktion und Koerzitivität.

2.4.3.4 Nickel-Eisen-Legierungen und ihre Eigenschaften

Unter den hochwertigen weichmagnetischen Materialien stellen Nickel-Eisen-Legierungen mit einem Nickelgehalt von 30 bis 83 Atomprozent und Zusätzen wie Chrom, Kupfer und Molybdän die größte Gruppe dar. Die magnetischen Eigenschaften können durch Zusätze wie z.B. Titan oder durch eine Thermobehandlung geändert werden [BAR98].

Legierungen von Nickel und Eisen bilden die Grundlage für hochwertige weichmagnetische Werkstoffe. Die einzelnen Legierungen unterscheiden sich in ihrer Curietemperatur, der Permeabilität und der Sättigungsflussdichte (Tabelle 2.3).

Tabelle 2.3: Eigenschaften weichmagnetischer Materialien in Abhängigkeit vom Nickelgehalt [BOZ93]

Ni-Gehalt Atom %	Dicke, [mm]	Permeabilitäts- zahl, μ_r (max)	Anfangs- permeabilität (bei 0,4 A/m)	Sättigungs- polarisation J_{max} [T]	Koerzitiv- feldstärke H_C [A/m]
Ca. 36%	0,3	bis 20.000	bis 3.000	1,3	bis 50
47% bis 50%	0,2	60.000	6.000	1,55	5
50% bis 65%	0,2	90.000	45.000	1,5	1,5
65% bis 70%	0,2	120.000	45.000	0,8	1,5
70% bis 80%	0,05	300.000	130.000	0,8	0,5

Während die Sättigungsflussdichte nur von der Materialzusammensetzung abhängig ist, werden die Permeabilität und Koerzitivfeldstärke auch durch die Form der Hystereseschleife und der Strukturform bestimmt [BAR88].

Der Einsatzbereich dieser Legierungen ist von der Materialzusammensetzung abhängig. Zum Beispiel weist eine Nickel-Eisen Legierung mit einem Nickelgehalt von bis zu 36% ein besonders hohes Ausdehnungsvermögen auf. Messsysteme, Stromwandler und Teile für Relais werden aus weichmagnetischen Materialien mit einem Nickelgehalt von etwa 50% hergestellt. Legierungen mit einem Nickelgehalt von über 70% weisen die niedrigsten Koerzitivfeldstärken und höchsten Permeabilitätswerte aller Magnetwerkstoffe auf [RIS99]. Werden große Permeabilitätswerte und kleine Feldstärkeverluste bei Nickel-Eisen-Legierungen angestrebt, sollte der Nickelanteil mindestens 80% betragen. In Abhängigkeit vom Nickelgehalt ist es möglich, eine sehr steile und schmale oder besonders flache Hystereseschleife zu bekommen. Aus diesem weichmagnetischen Material kann man z.B. Schalt- und Speicherkerne herstellen.

3 Aufgabe und Zielsetzung

Die unterschiedlichen Arten der verfügbaren Wirbelstromsensoren werden zur zerstörungsfreien Prüfung leitfähiger Materialien, zur Abstands- und Dickenmessung sowie zur Materialerkennung mittels harmonischer Analyse verwendet. Dabei ist die Größe des analysierten Bereichs festgelegt durch die geometrischen Abmessungen des Sensors. Insbesondere für die Objektiefe, wo für eine hohe Ortsauflösung eine große Messgenauigkeit benötigt wird, ist eine Miniaturisierung des Wirbelstromsensors von Vorteil. Die Fertigung von Bauteilen in der Mikrotechnologie ermöglicht durch hohe Produktionszahlen auch eine Reduzierung der Herstellungskosten.

In Rahmen dieser Arbeit soll ein Wirbelstromsensor in Dünnschichttechnik entworfen, aufgebaut und vermessen werden. Die Dimensionen des Sensors werden mittels umfangreicher Simulationen im Rahmen einer weiteren Dissertation ermittelt.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht in der Erarbeitung einer Technologiefolge, die die Herstellung eines Wirbelstromsensors in Dünnschichttechnik erlaubt. Schon bei der Sensorauslegung müssen parallel zu den Simulationsergebnissen auch die Fertigungsaspekte berücksichtigt werden. Die Sensorauslegung wird auf Simulationsdaten und die ermittelten Werkstoffdaten gestützt. Es müssen die Anforderungen an die Funktion des Sensors beachtet sowie die Randbedingungen zur Fertigung des Sensors mittels mikrotechnologischer Verfahren miteinbezogen werden.

Die Teilziele bei der Entwicklung des Wirbelstromsensors bestehen in der Bestimmung der optimalen Prozessparameter im dünnfilmtechnischen Herstellungsprozess, Werkstoffuntersuchungen, welche die speziellen Anforderungen hoher Sensorempfindlichkeit erfüllen sollen, und der Entwicklung einer Prozessfolge unter Berücksichtigung der Simulationsergebnisse.

Nach dem Aufbau des Wirbelstromsensors in Dünnschichttechnik sollen Abstandsmessungen mit unterschiedlichen Materialien durchgeführt und optimale Messparameter bestimmt werden.

4 Vorgehensweise

Um die Aufgabenstellung zielgerecht zu bearbeiten, wurde zu Beginn die Vorgehensweise festgelegt. Dieser Plan beinhaltet die Entwicklung, Fertigung und gezielte experimentelle Untersuchungen eines Wirbelstromsensors (Bild 4.1).

Das Thema wird in Koordination mit Heri Iswahjudi bearbeitet, der Konzepte zur Simulation des Sensors mittels der Finite Element Methode (FEM) und zur analytischen Berechnung des Sensors entwickelte [ISW05].

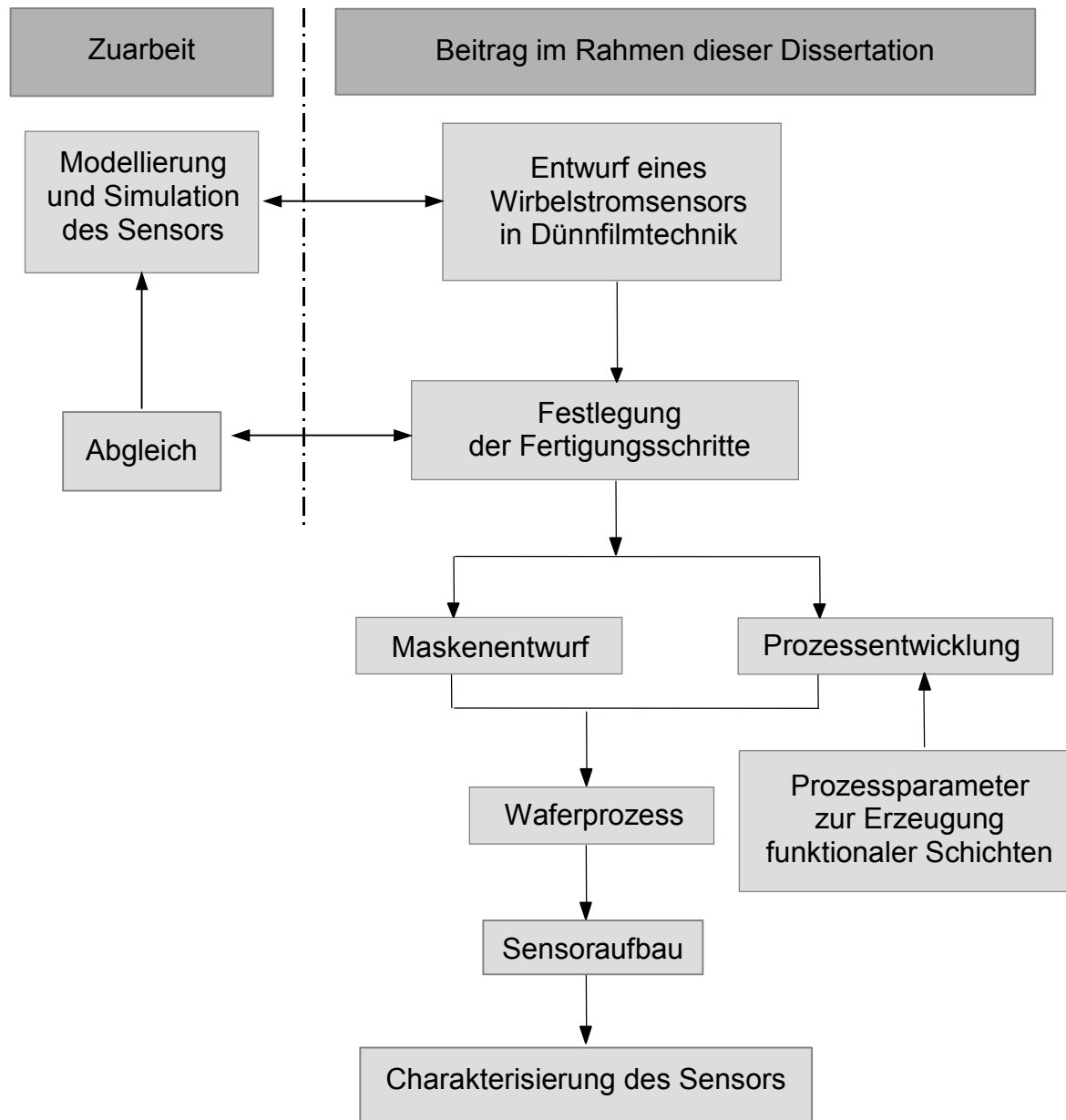


Bild 4.1: Vorgehensweise

Bei der Simulation und Modellierung des Sensors werden sowohl mechanische als auch magnetische Eigenschaften unterschiedlicher Kernvarianten mit FEM untersucht. Auf der Grundlage der Simulationsergebnisse wird die Strukturenform mit den optimalen magnetischen Kennwerten ermittelt.

Im Rahmen des Entwurfes des Mikrowirbelstromsensors ist zunächst das grundsätzliche Funktionsprinzip dieses induktiven Sensors festzulegen. Bei der Festlegung der Fertigungsschritte sollen unterschiedliche Parameter wie Fertigungskomplexität, die Anzahl der Fertigungsschritte, die Eigenschaften des Bauteils und der Platzbedarf miteinbezogen werden. Unter Berücksichtigung aller Faktoren soll ein Geometrieentwurf des Sensors erstellt werden.

Zur Abschätzung des Geometrieinflusses werden theoretische Untersuchungen und Analysen mittels Simulationen durchgeführt. Diese Simulationen erlauben die Beurteilung des magnetischen und elektrischen Verhaltens des Bauelementes und stellen damit eine Option zur Verbesserung des Bauteils bereits in der Entwurfsphase dar. Nach der Festlegung der Fertigungsschritte sind Entwurf und Simulationen miteinander abzustimmen.

Für den Sensorentwurf relevante Werkstoffeigenschaften sollen bereits bei der Prozessentwicklung analysiert werden. Zudem werden die Prozessparameter zur Erzeugung von funktionalen Schichten getestet. Die Untersuchung magnetischer Werkstoffe hinsichtlich ihrer Abscheidungs- und magnetischen Eigenschaften werden vorgesehen. Dabei werden Kennwerte für die Koerzitivität, Permeabilität und Sättigung weichmagnetischer Werkstoffe beachtet. Neben den Untersuchungen magnetischer Materialien werden auch Prozesse zur Herstellung von Leiterstrukturen optimiert. Die Abscheidungs- und Strukturierungsmöglichkeiten erfolgen parallel zu Untersuchungen zur Leitfähigkeit und zur Ermittlung der maximalen Strombelastbarkeit.

Als mögliche Isolationsmaterialien werden organische Stoffe untersucht. Bei der Auswahl spielen Strukturierbarkeit und Prozessdauer eine wichtige Rolle. Es soll Planarisierungstechnik eingesetzt werden, welche die Eigenschaften des Isolationsmaterials und der Thermobehandlung berücksichtigt und keine Auswirkungen auf die magnetischen Eigenschaften des eingebetteten Materials mit sich bringt.

Bei der Prozessentwicklung werden zuerst die einzelnen Prozessschritte der Sensorfertigung definiert und in einem Waferprozess zusammengeführt. Hierbei fließen die Ergebnisse aus der Sensorentwicklung und die Untersuchungsergebnisse der Werkstoffe ein. Anschließend werden Wirbelstromsensoren auf der Waferoberfläche angeordnet und die Abstände zwischen den einzelnen Bauteilen berechnet. Parallel zur Prozessentwicklung sind die Maskenschritte zu definieren. Nach der Festlegung von Fertigungsschritten werden die photolithographischen Masken hergestellt.

Nach Festlegung des Waferprozesses kann mit dem Aufbau des Wirbelstromsensors begonnen werden. Mehrere Wafer werden parallel hergestellt, um eine möglichst hohe Zahl von Bauteilen zu bekommen. Nach dem Aufbau sind die Wirbelstromsensoren zu charakterisieren. Dazu werden Abstandsmessungen mit Proben unterschiedlicher Materialien durchgeführt und miteinander verglichen.

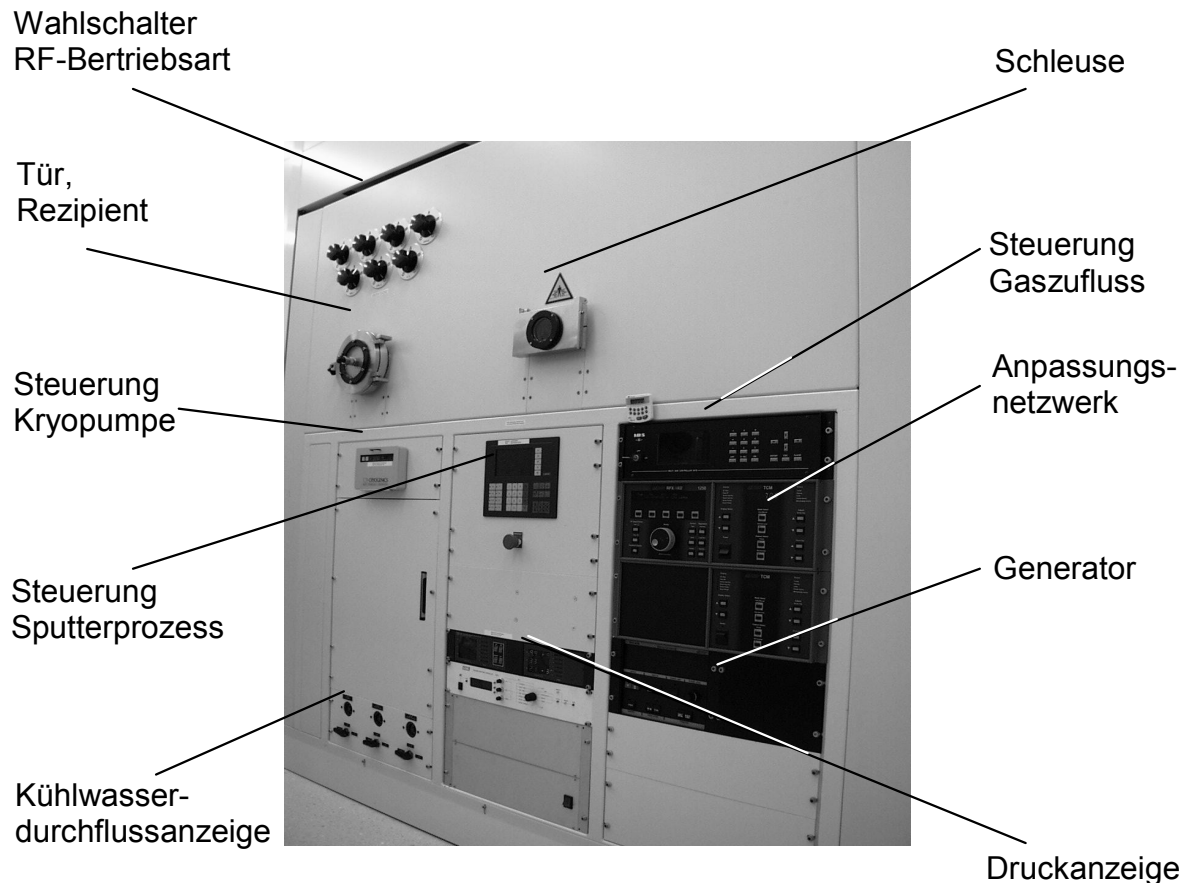
5 Versuchstechnik

5.1 Fertigungstechnologien

5.1.1 Schichterzeugung

5.1.1.1 Kathodenzerstäubung (Sputtern)

Der Sputterprozess gehört zur Prozessgruppe der physikalischen Abscheidungen aus der Gasphase und ist besonders für die Dünnschichtherstellung geeignet [ELB96]. Bild 5.1 zeigt eine MRC-Sputteranlage des Instituts für Mikrotechnologie.

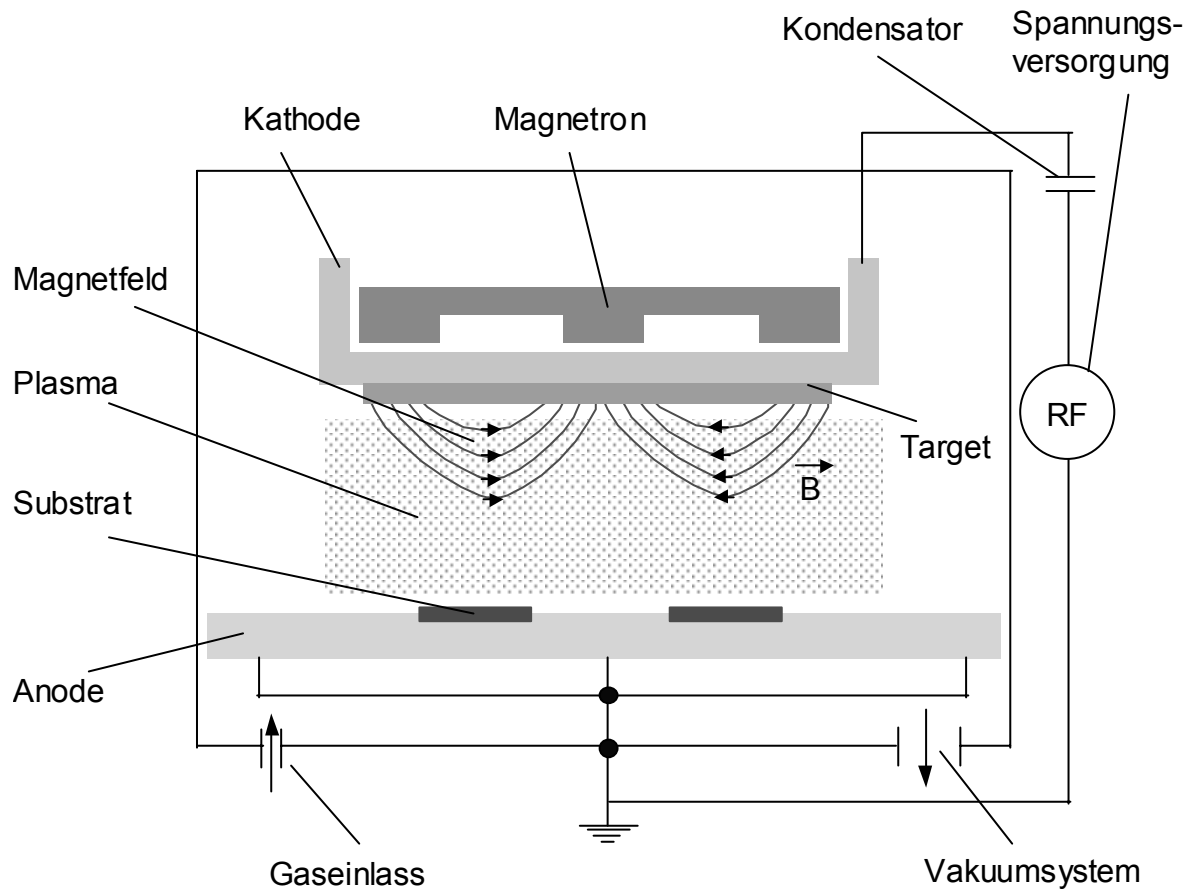


2005 imt 5017-028

Bild 5.1: Sputteranlage (Hersteller: ehem. Firma MRC, USA)

Beim sogenannten RF(radio frequency)-Sputtern wird an das Target eine Wechselspannung angelegt (Bild 5.2), so dass in der einen Phase Ionen auf das Target beschleunigt werden und Material abtragen. In der anderen Phase findet ein Ladungsausgleich statt. Damit ist auch das Sputtern von nichtleitenden Materialien möglich. Um die Ionisierungsrate durch die erzeugten Sekundärelektronen zu erhöhen, wird beim Magnetronsputtern unter dem Target ein starkes Magnetfeld erzeugt. In diesem Feld werden die Elektronen auf Kreisbahnen geführt und bewegen sich dicht an der Targetoberfläche. Zum einen werden dadurch höhere Abtragsraten realisiert, zum anderen kann der Prozessdruck verringert werden, so dass es zu weniger Kollisionen zwischen abgesputterten Atomen und anderen

Gasteilchen kommt und die Atome eine höhere kinetische Energie haben. Auf dem Substrat bildet sich dann eine sehr haftfeste Schicht von einigen Mikrometern Dicke.



2005 imt 5017-029

Bild 5.2: Prinzip des Sputterprozesses

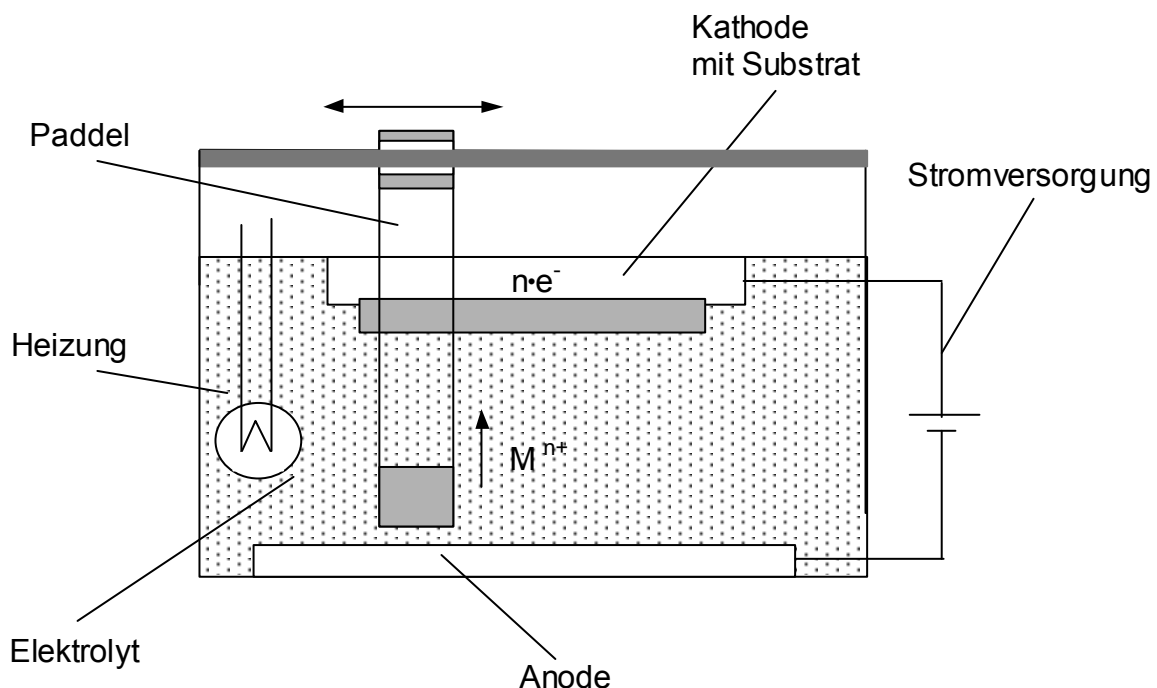
Gegenüber dem Plasma laden sich die Wände des Rezipienten und das Target negativ auf, da während der positiven Halbwelle der Wechselspannung mehr Elektronen gesammelt werden als Ionen während der negativen Halbwelle, da letztere aufgrund ihrer größeren Masse relativ träge sind und ihre Bewegungen nur langsam dem Wechsel des elektrischen Feldes folgen können. Durch einen Kondensator in der Zuleitung des Targets wird verhindert, dass die negativen Ladungen abfließen. Das Target ist deshalb gegenüber dem Substrat negativ geladen. Dieser Effekt wird durch das ungleiche Flächenverhältnis von Target zum mit dem Rezipient verbundenen Substrat zusätzlich verstärkt, weil Letzteres aufgrund seiner größeren Fläche eine größere Anzahl der Ionen während der negativen Halbwelle der Wechselspannung einsammelt.

5.1.1.2 Galvanische Abscheidung

Das Prinzip der Galvanoformung beruht auf elektrochemischen Prozessen, die an der Phasengrenze zwischen einer festen Elektrode und einem flüssigen Elektrolyt ablaufen. Die Stromquelle liefert die elektrische Energie, die in chemische Energie umgewandelt wird.

Eine als Anode kontaktierte Elektrode liefert im elektrolytischen Bad die Metallionen, die zur Schichterzeugung dienen. Die zweite Elektrode im Elektrolyt ist die Kathode. Auf dieser findet die Schichtbildung statt. Die positiv geladenen Metallionen (Kationen) werden aus dem Elektrolyt während des galvanischen Prozesses entfernt. Bei Anlegen einer äußeren Stromquelle wandern die Metallionen in Richtung Kathode, nehmen dort Elektronen auf und bilden einen Schichtniederschlag auf der Oberfläche (Bild 5.3).

Beim galvanischen Prozess wird ein Träger (Wafer), der mit einer metallischen Startschicht und strukturiertem Photoresist beschichtet ist, als Kathode geschaltet. Die Metallatome lagern sich auf von Photoresist nicht abgedeckten Bereichen der Startschicht an und bilden dort einen dünnen Film auf dem Wafer. Das Umwälzen der Elektrolytlösung erlaubt die Abscheidung sehr homogener Schichten. Die Gleichmäßigkeit der Strukturhöhen bei unterschiedlichen Abmessungen hängt von den Stromverhältnissen ab. Die Abscheidung erfolgt in einer speziellen Galvanikzelle, die mit einem Paddel zur Umwälzung des Elektrolyts und einem Heizungselement ausgerüstet ist.



2005 int 5017-030

Bild 5.3: Prinzip der galvanischen Abscheidung

Die galvanische Abscheidung erlaubt die Herstellung von Schichten im Bereich von einigen Mikrometern in relativ kurzen Zeiten (etwa zwei Größenordnungen schneller im Vergleich zum Sputtern).

Die für den Aufbau des Wirbelstromsensors verwendeten Materialien sind Kupfer, Nickel-Eisen, Nickel und Gold. All diese Materialien erfordern materialspezifische Elektrolytlösungen (siehe Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1: Verwendete Materialien, Elektrolyte und ihre Anwendung

Material	Elektrolyt	Einsatz
Kupfer	auf Kupfersulfat basierend	Elektrische Kontakte, Leiter, Vias, Kontaktpads
Nickel-Eisen	auf Sulfat basierend	Magnetischer Kern
Nickel	auf Sulfamid basierend	Diffusionssperre in Kontaktpads
Gold	auf Sulfid basierend	Korrosionsschutz für elektrische Kontakte

Die Anforderungen bei der Herstellung von Mikrobauanteilen an die magnetischen Eigenschaften, die Temperaturbeständigkeit und Härte sind hoch. Deswegen werden neben reinen Metallen bei der Galvanoformung auch Legierungen eingesetzt. Hier kommen meistens Nickel-Eisen-Legierungen zum Einsatz, bei denen durch die stöchiometrische Legierungszusammensetzung die Schichteigenschaften beeinflusst werden können. Nickel-Eisen-Legierungen ermöglichen es, Mikrostrukturen mit unterschiedlichen mechanischen und magnetischen Eigenschaften herzustellen. Zur Abscheidung wird ein Elektrolyt auf Sulfatbasis verwendet, der Ionen beider Metalle enthält. Der Eisengehalt kann durch Änderung der Prozessparameter variiert werden.

Die Qualität galvanischer Mikrostrukturen ist stark von der Wahl der Prozessparameter und -bedingungen sowie von der Qualität der vorher gegangenen Prozessschritte (z.B. der Photolithographie) abhängig. Ein häufig auftretendes Problem ist eine unhomogene Verteilung der Metallschicht über das gesamte Substrat. Daher ist eine mechanische Bearbeitung (Planarisierung) von Mikrostrukturen erforderlich.

5.1.2 Photolithographieprozess

Die Aufgabe der Lithographie ist die formgetreue, fehlerfreie Abbildung einer Vielzahl einzelner Strukturen auf einen Träger. Die Güte des photolithographischen Prozesses wird durch die erreichte Linienbreite, die korrekte Strukturlage und die Anzahl unerwünschter Strukturfehler beurteilt.

Ein flüssiger, lichtempfindlicher Lack wird durch Aufschleudern auf einen Träger gleichmäßig aufgebracht. Eine Variation der Drehgeschwindigkeit erlaubt die Herstellung von unterschiedlich dicken Schichten. In Abhängigkeit von der gewünschten Schichtdicke kommen unter Beachtung der Viskosität des Lackes Drehzahlen von 500 bis zu 6.000 Umdrehungen pro Minute in Betracht.

Die einzelnen Ebenen des Bauteils werden auf photolithographische Masken übertragen. Das Layout wird mit Hilfe von CAD (CAD = Computer-Aided Design) erzeugt. Dabei wird zuerst ein Maskendesign entworfen, das die Vorlage für die photolithographische Maske bildet. Es handelt sich um mit Chrom beschichtete Glasplatten, die an Strukturstellen und in Abhängigkeit von der Art des eingesetzten Photoresists, transparent bzw. lichtundurchlässig sind. Durch diese Masken hindurch wird der auf das Substrat aufgeschleuderte Photoresist mit dem kurzwelligen UV-Licht einer Quecksilberdampflampe belichtet, wobei die Maskenstruktur in ein Lackprofil übertragen wird. Nach der Belichtung wird ein Teil der Photoresistschicht durch Sprühentwickeln entfernt, es verbleiben die gewünschten Photoresiststrukturen auf der Substratoberfläche.

Die chemische Zusammensetzung des Photoresists spielt eine wichtige Rolle für die photoempfindlichen Eigenschaften. Photolacke unterscheidet man danach, welcher Bereich nach der Belichtung im Entwickler löslich wird. Beim Aufbau des Wirbelstromsensors wurden drei Arten von Photoresist verwendet: Positive (AZ 9260, Fa. Clariant), negative (SU-8-25 und SU-8-2005, Fa. Micro-Cemicals) und Image-Reversal-Photoresists (AZ 5214, Fa. Clariant).

Positivlacke sind dadurch gekennzeichnet, dass nach der Belichtung die belichteten Bereiche entfernt werden. Bei negativen Photoresists werden nicht belichtete Bereiche gelöst. Bei den Image-Reversal-Photoresists handelt es sich um Photolacke, die sich durch Einsatz einer speziellen Prozessfolge letztlich wie Negativresists verhalten. Der Negativprozess wird in diesem Fall durch zwei zusätzliche Prozessschritte (eine Thermobehandlung und eine Flutbelichtung) erreicht. Positive Photoresists eignen sich für den Aufbau von unterem Kernteil, Spulen, Polen und Kontaktpads. Der Image-Reversal-Photoresist wird bei der Strukturierung von Gruben, als Negativlack und bei der Herstellung von Vias als Positivlack eingesetzt. Das photoempfindliche Epoxidharz SU-8 lässt sich nur negativ strukturieren und wird für die Isolationsschichten verwendet.

Ein zuverlässiger photolithographischer Prozess ist eine Grundvoraussetzung, um den Gesamtprozess beim Bauteilaufbau erfolgreich durchführen zu können. Um Abweichungen in der Qualität und im Herstellungsprozess zu vermeiden, ist es notwendig, konstante klimatische Bedingungen im Reinraum einzuhalten. Hier spielen Temperatur und Luftfeuchtigkeit eine große Rolle, da die Eigenschaften der Photolacke und Entwicklerflüssigkeiten temperaturabhängig sind.

Aufbringen von Photoresist

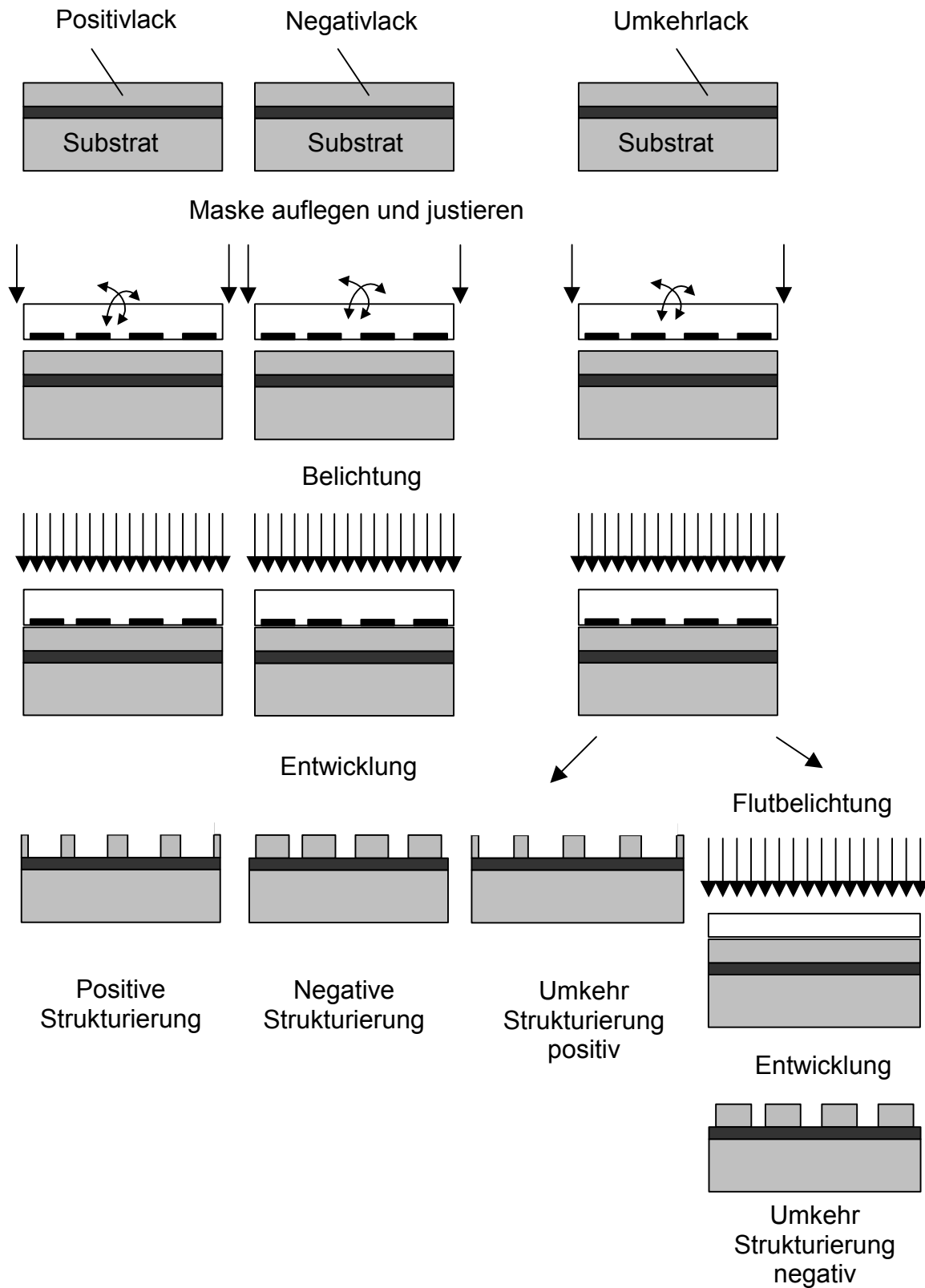


Bild 5.4: Gegenüberstellung von Photoresisten

Positive Photoresists werden beim Aufbau des Wirbelstromsensors bei Strukturhöhen ab 5 μm angewendet, der Umkehr-Photoresist AZ 5214 bei Strukturen mit Höhe kleiner als 3 μm . Bild 5.4 stellt die positiven, negativen und Reversal Belichtungstechniken gegenüber.

Bei dem lithographischen Prozess werden folgende Schritte durchgeführt. Bei der Verwendung des Reversalresist werden zusätzliche Schritte (Nr. 4 und 5) eingeführt.

1. Beschichten des Substrats mit einem Photoresist
2. Thermische Behandlung des Resists, um Lösungsmittel auszutreiben
3. Positionieren des Substrats in der Belichtungsanlage, Justage und Belichtung
4. Thermische Behandlung des Resists (wird nur beim Reversalprozess benötigt)
5. Zweite Belichtung (Flutbelichtung), wobei die Reversal-Komponente im Resist aktiviert wird (nur beim Reversal-Prozess benötigt)
6. Entwickeln des Resists
7. Optische Kontrolle der erzeugten Strukturen.

Der erste Schritt der Photolithographie ist die Belackung des Substrats. Bei manchen Prozessen wird vor der Belackung ein Haftvermittler aufgebracht, der aus der Gasphase oder in flüssiger Form auf das Substrat abgeschieden bzw. aufgeschleudert wird. Der nächste Prozessschritt ist die Behandlung auf einer Heizplatte bei einer Temperatur von ca. 100°C (Prebake), um die Lösungsmittel aus dem Resist zu entfernen. Danach kommt der Wafer in die Belichtungsanlage und wird dort positioniert (justiert) und belichtet.

Durch die Photoreaktion bei der Belichtung von Positivlacken entstehen aus der wasserunlöslichen, photoaktiven Komponente wasserlösliche Reaktionsprodukte. Das Verhältnis der Löslichkeit zwischen belichtetem und unbelichtetem Resist variiert je nach Prozessbedingungen um den Faktor 10 bis 1.000. Die Entwicklung erfolgt entweder manuell oder in einem programmierbaren Sprühentwickler. Bei der Sprühentwicklung wird die Entwicklerlösung kontinuierlich auf die rotierende Probe aufgesprüht. Nach Abschluss der Entwicklung wird das Substrat mit deionisiertem Wasser abgespült und anschließend mit Stickstoff getrocknet. Beim Image-Reversal-Photoresist folgt eine weitere Thermobehandlung und eine Flutbelichtung (durch eine Glasmasken).

Die photochemische Umwandlung findet bei Wellenlängen zwischen 300 und 450 nm statt und ist mit einer Lichtabsorption verbunden. Mit zunehmender Dauer des Belichtungsprozesses nimmt die Lichtabsorption ab, weil sich die Anzahl der unbelichteten (umgewandelten) Moleküle verringert. Die notwendige

Belichtungsdosis wird in Abhängigkeit vom Resist und seiner Schichtdicke berechnet.

Beim Belichtungsprozess ist die insgesamt eingestrahlte UV-Dosis eine der wichtigsten Einflussgrößen. Zum Beispiel liegt der Flankenwinkel (Bild 5.5) bei einer niedrigen Belichtungsdosis für positiven Resist bei 80° . Dabei nimmt der Umwandlungsprozess mit zunehmender Tiefe ab, so dass bei der Entwicklung obere Randbereiche stärker aufgelöst werden. Diese Erscheinung führt bei negativem Photoresist zu einem stärker entwickelten unteren Bereich der Strukturen.

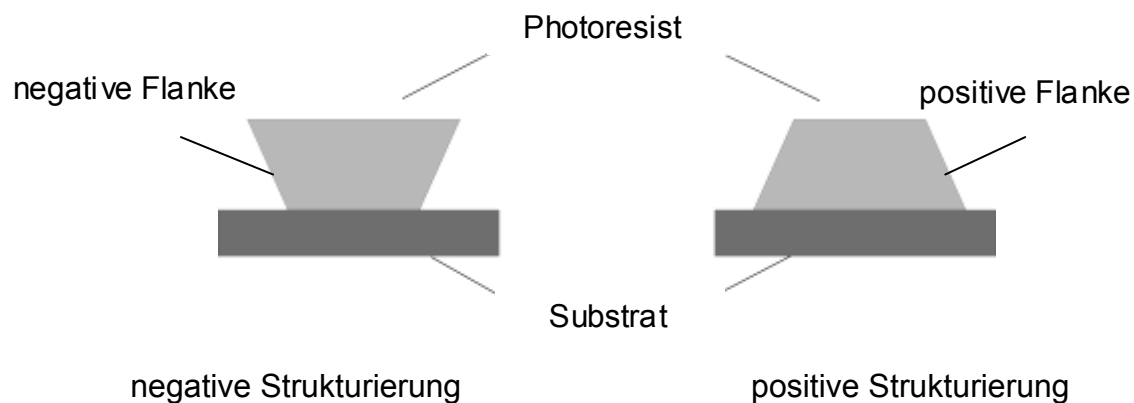


Bild 5.5: Photoresistflanken bei negativer und positiver Strukturierung

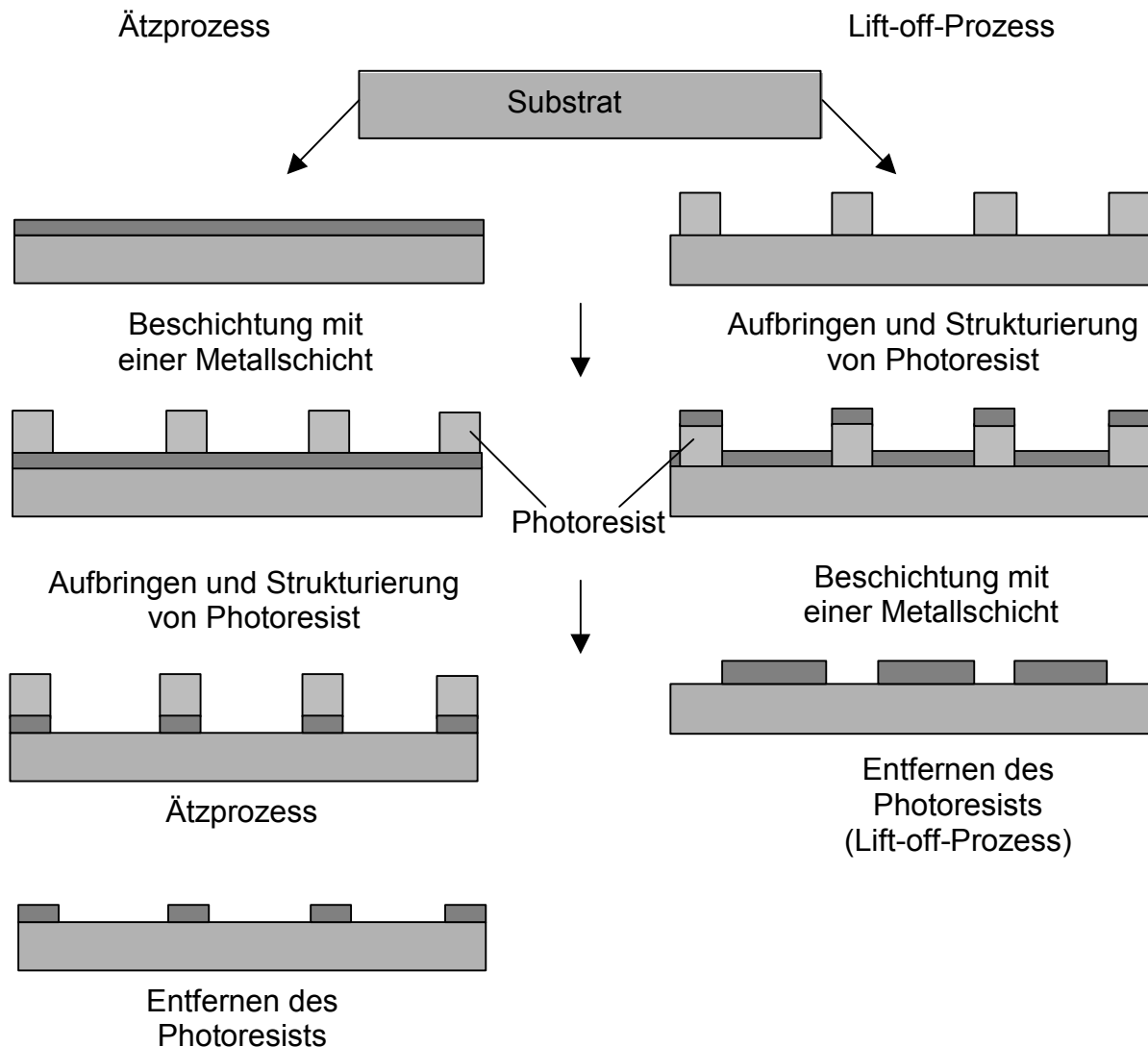
In Abhängigkeit vom Material, dem Anwendungsgebiet und dem Thermobehandlungsprozess werden unterschiedliche Heizplatten eingesetzt. Am Institut für Mikrotechnologie bestehen verschiedene Möglichkeiten zur Durchführung einer Thermobehandlung. Tabelle 5.2 gibt einen Überblick der Thermobehandlungsparameter und Einsatzgebiete der Anlagen. Am Institut für Mikrotechnologie werden zwei unterschiedliche Heizplatten eingesetzt: Offene und geschlossene Heizplatte. Bei offenen Platten beträgt die Maximaltemperatur nur 300°C , bei geschlossenen 600°C .

Tabelle 5.2: Überblick von Heizanlagen

Parameter	Geschlossene Heizplatte	Offene Heizplatte
Maximale Temperatur in $^\circ\text{C}$	600	300
Atmosphäre	Umgebungsluft	Umgebungsluft
Anwendung	Trocknen von Photoresist	Entfernung von Restfeuchtigkeit von der Waferoberfläche Trocknen von Photoresist

5.1.3 Strukturierung dünner Schichten

Bei der Herstellung von Strukturen in dünnen Schichten werden unterschiedliche Verfahren eingesetzt (Bild 5.6).



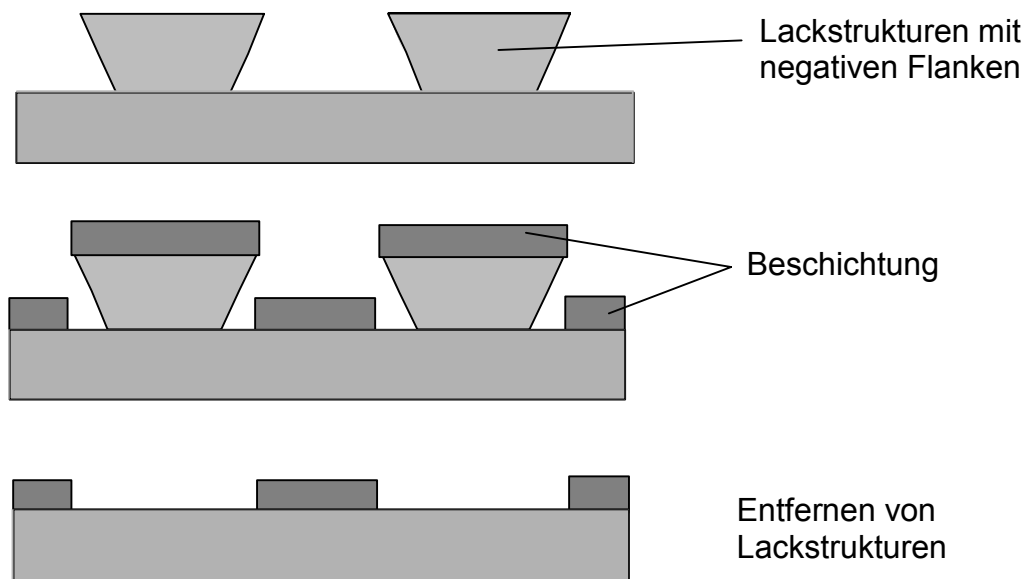
2005 int 5017-033

Bild 5.6: Strukturierung dünner Schichten mittels Ätz- und Lift-Off-Prozess

Eine Möglichkeit zur Erzeugung von strukturierten Schichten ist die Ätztechnik. Hierbei wird das Substrat zunächst vollständig beschichtet und anschließend Teile der Schicht durch Ätzen entfernt. Die gewünschte Schichtgeometrie wird dabei von einer Schicht aus strukturiertem Photolack geschützt, der anschließend entfernt wird.

Bei der Strukturierung dünner Schichten mit dem Lift-off-Verfahren werden die Substrate vor der Beschichtung mit einer Photolackschicht versehen, die durch Belichtung und Entwicklung strukturiert wird. Die Schichtabscheidung erfolgt sodann sowohl auf den freiliegenden Bereichen des Werkstücks als auch auf der Photolackschicht. Nach der Entfernung des Photolacks durch Lösungsmittel oder durch Plasmaveraschen bleibt eine strukturierte Schicht zurück. Problematisch wird

bei der Anwendung des Lift-off-Verfahrens die Herstellung gut ausgebildeter Strukturkanten, da es zur Ausbildung von undefinierten Kanten kommt. Bei diesem Prozess sollte deshalb ein negativ strukturierter Reversal-Photoresist angewendet werden (Bild 5.7). In diesem Fall erleichtern negative Kantenprofile den Lift-off-Prozess, allerdings wird die Kontaktfläche zwischen dem Substrat und dem Photoresist verkleinert und damit die Schichthftung reduziert. Dabei ist zu beachten, dass die Dicke der abzuschheidenden Schicht die Photoresistdicke nicht überschreiten darf.



2005 imt 5017-034

Bild 5.7: Einsatz negativer Flanken im Lift-off Prozess

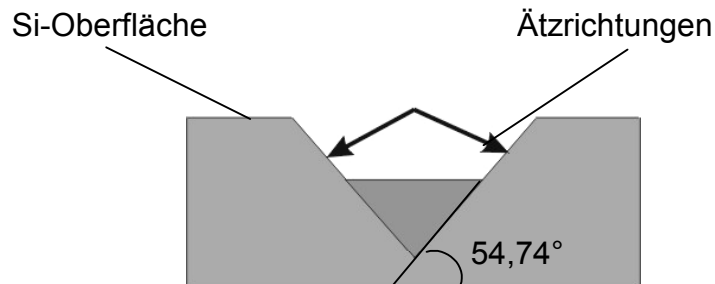
Der Abtrag kann mit einem nasschemischen oder einem Trockenätzverfahren erreicht werden. Beim nasschemischen Ätzen wird eine hohe Selektivität erreicht, da die chemische Reaktion im Material selektiv verläuft. Zudem verläuft ein nasschemischer Ätzprozess isotrop, und es können unterschiedliche Unterätzungen der Ätzmaske entstehen, was zu einer fehlerhaften Strukturierung führt. Durch den Einsatz geeigneter Strukturgeometrien und -größen kann eine Fehlerminimierung erreicht werden.

5.1.3.1 Nasschemischer Ätzprozess

Zur Herstellung von Strukturen in Silizium wird eine nasschemische Ätztechnik eingesetzt. Diese Technik wird bei der Herstellung des Wirbelstromsensors für den Grubenaufbau eingesetzt. Zwei unterschiedlich tiefe Gruben werden für den Kernteil und für Kontaktpads in eine Siliziumoberfläche geätzt. Der Herstellungsprozess der Gruben findet in Kooperation mit der TU Chemnitz statt. Die Photolithographie- und Trockenätzprozesse werden vom imt und das nasschemische Ätzen an der TU Chemnitz durchgeführt.

Als Ätzmittel beim Ätzprozess dient KOH-Lösung. Die Prozesstemperatur beträgt ca. 100°C. Das Ätzverhältnis zwischen (100)- und (111)-Ebenen beträgt

400:1. Zur Maskierung werden strukturierte Schichten aus SiO_2 und Si_3N_4 eingesetzt. Beim Ätzen von Wafern mit (100)-Oberfläche wird die Oxidmaske kaum unterätzt. Die besonders langsam ätzende (111)-Fläche bildet Seitenflächen mit quadratischen oder rechteckigen Öffnungen, invertierten Pyramiden oder Pyramidenstümpfen mit quadratischer oder rechteckiger Basis. Der Winkel zwischen der (100)-Oberfläche und den Seitenwänden beträgt $54,74^\circ$.



2005 int 5017-035

Bild 5.8: Anisotropes nasschemisches Ätzverfahren

Der Vorteil des nasschemischen Ätzens besteht in den hohen Abtragsraten sowie der Möglichkeit, Ätzraten mit hoher Gleichmäßigkeit und Reproduzierbarkeit einstellen zu können. Der nasschemische Ätzprozess wird nicht nur bei der Strukturierung von unterschiedlichen Metallen, sondern auch bei SiO_2 und Si_3N_4 sowie poly- und einkristallinem Silizium angewendet.

5.1.3.2 Trockenätzverfahren

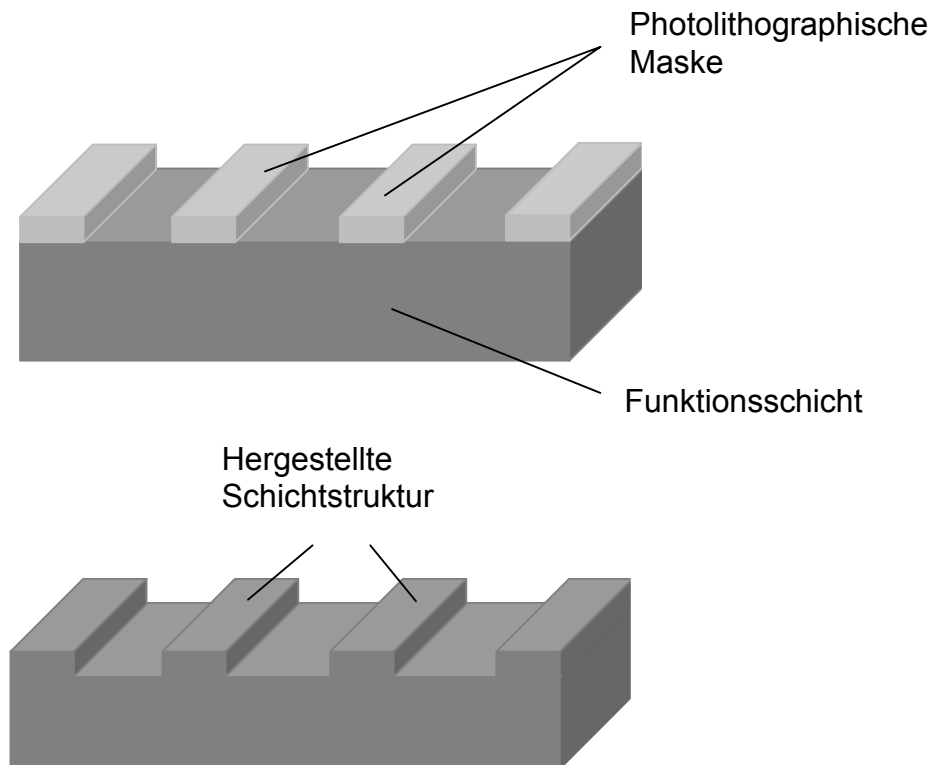
Beim Trockenätzen handelt es sich um ein Verfahren, bei dem die zu ätzende Schicht mit einem Ätzgas im Plasmazustand in Kontakt gebracht wird. Bei diesem Verfahren wird der Träger mit der Metallschicht und einer strukturierten Photoresistschicht in eine Vakuumkammer eingeschleust und bis zum Erreichen des Hochvakuums evakuiert. Bei diesem Prozess wird ein Edelgas (Argon) in die Kammer eingeführt.

Tabelle 5.3 zeigt die Ätzraten unterschiedlicher Materialien, die bei der Sensorherstellung eingesetzt werden. Eine Steuerung der Abtragsraten ist über die Zeit und die Ätzparameter möglich.

Tabelle 5.3: Ätzraten der eingesetzten Materialien

Ätzparameter	NiFe	Cu	Cr	Al_2O_3
Ätzrate [nm/min] bei: 500 V, $0,8 \text{ mA/cm}^3$	42,5	63,0	27,0	16,0
Ätzrate [nm/min] bei: 750 V, $1,0 \text{ mA/cm}^3$	65,0	88,0	50,0	25,0

Die Unterätzung der Maske ist gering und die Selektivität ist hoch, da nur die Schichten geätzt werden, die nicht mit Photolack geschützt sind (Bild 5.9). Ein weiterer Vorteil des Trockenätzens liegt im geringen Verbrauch von Chemikalien und der Möglichkeit, durch Ätz- und Plasmaparameter das Ätzprofil zu beeinflussen.



2005 int 5017-036

Bild 5.9: Anisotroper Ätzprozess

5.2 Prozessanlagen

Zum Aufbau von Wirbelstromsensoren wird eine Kombination von mehreren Anlagen eingesetzt. Zum Aufbringen metallischer Startschichten werden Sputteranlagen eingesetzt, zum Abtrag von Schichten kommt eine Ionenstrahl-Ätzanlage zum Einsatz.

5.2.1 Beschichtungsanlagen

Für die Durchführung des Versuches werden zwei Sputteranlagen (ehem. Fa. MRC) eingesetzt. Die schematische Darstellung einer Sputteranlage zeigt Bild 5.1.

Die Anlagen sind ausgelegt für die Beschichtung von Wafern mit einem Durchmesser von 4 Zoll (ca. 100 mm), die auf Kupferplatten in die Anlage eingebracht werden. In den Anlagen befinden sich je drei Targets aus unterschiedlichen Materialien, mit denen wahlweise beschichtet werden kann. Hierzu wird das Werkstück auf einem Drehteller unter dem jeweiligen Target positioniert. Die nicht benötigten Targets (bzw. die Heizstation) werden durch drehbare Blenden abgedeckt. Zusätzlich ist eine Heizstation vorhanden.

Für jede Anlage stehen zwei RF-Generatoren zur Verfügung (Leistung maximal 1.250 bzw. 625 W). Die RF-Leistung wird über ein Anpassungsnetzwerk aus Kapazitäten und Induktivitäten an die Anlage abgegeben. Dieses ist nötig, um sicherzustellen, dass ein möglichst großer Teil der erzeugten Leistung als Wirkleistung tatsächlich in den Prozess eingekoppelt und nicht reflektiert wird und damit verloren geht. Die Abstimmung des Netzwerks erfolgt automatisch durch Einstellen der Kapazität zweier Kondensatoren.

Die Vakuumerzeugung erfolgt durch zweistufige Pumpsysteme, bestehend aus einer Vorvakuumpumpe und einer Hochvakuumpumpe. Als Vorvakuumpumpen werden Drehschieberpumpen eingesetzt. Als Hochvakuumpumpe wird in einer Anlage eine Turbomolekularpumpe verwendet, die die Gasteilchen durch einen schnelllaufenden Rotor in Richtung Pumpenausgang befördert. In der anderen Anlage wird eine Kryopumpe verwendet, in der die Gasteilchen bei Temperaturen von etwa 12 K ausgefroren werden. Diese Anlage ist zusätzlich mit einer Schleuse ausgestattet, welche es erlaubt, Werkstücke unter Beibehaltung des Vakuums in den Rezipienten einzubringen.

5.2.2 Maskenjustier- und Belichtungsanlage

Für die Belichtung von Photoresists bei der Wirbelstromsensorherstellung kommt die Maskenjustier- und Belichtungsanlage MA6 der Firma „Süss Microtech“ zum Einsatz.



2005 imt 5017-037

Bild 5.10: Maskenjustieranlage MA6 der Fa. Süss Microtech

Diese Belichtungsanlage besteht aus der Maskenjustier- und Belichtungseinheit und einem Steuergerät. Die Justier- und Belichtungseinheit setzt sich aus einem Justiertisch, einem Keilfehlerausgleichkopf mit Belichtungs-Chuck, einem Mikroskop

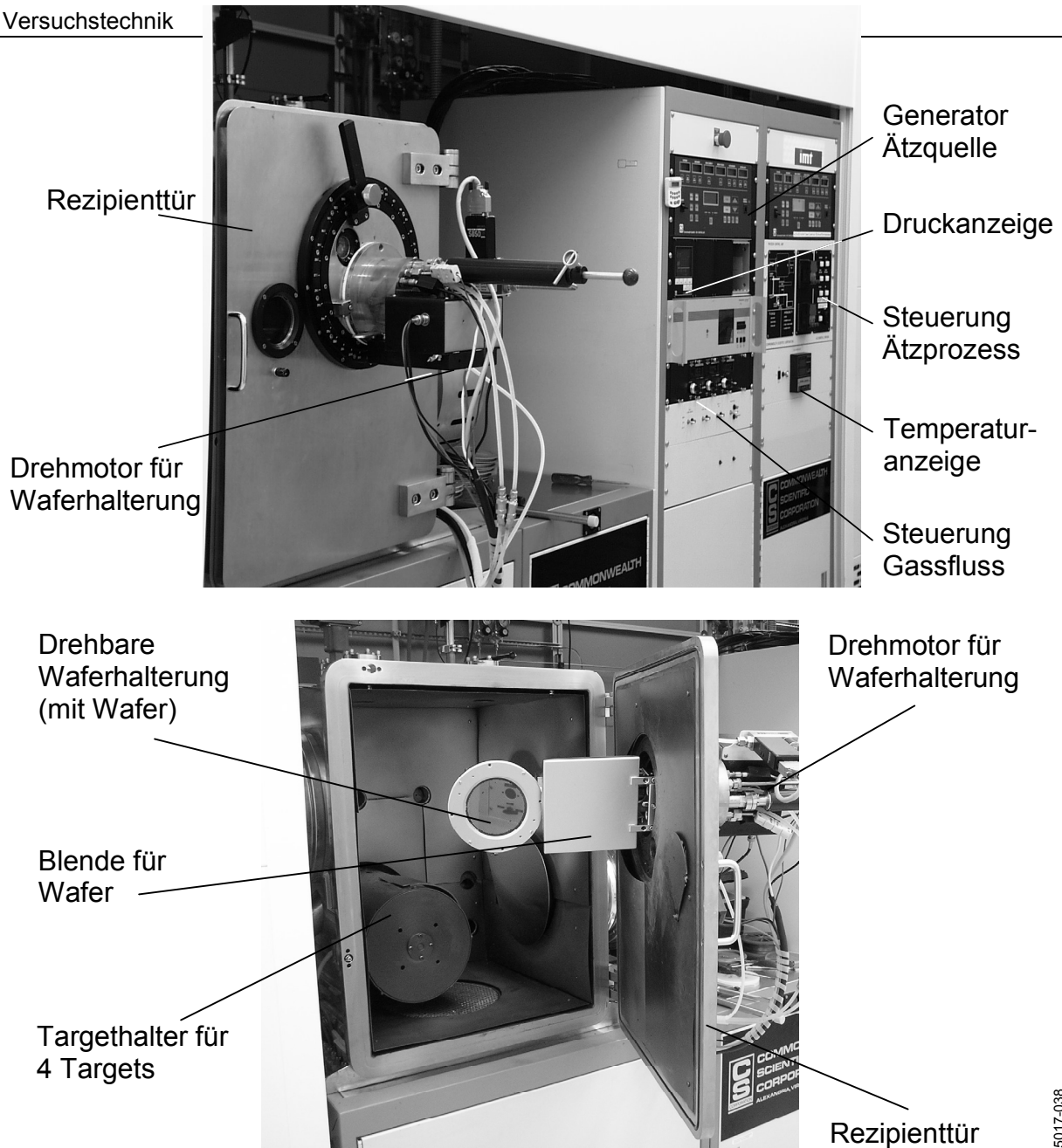
und der Belichtungseinheit zusammen (Bild 5.10). Zuerst wird die Maske auf dem Maskenhalter positioniert und mittels Vakuum angesaugt. Der zu belichtende Wafer wird auf dem Belichtungs-Chuck positioniert und ebenfalls mit Vakuum befestigt. Wenn sich der Wafer auf dem Chuck befindet, wird er nach oben unter die Maske bewegt. Bei der Justage wird der Wafer zuerst in einem kleinen Abstand zur Maske gehalten, so dass man den Tisch mit der Maske relativ zum Wafer bewegen kann. Nach der Justage wird der Belichtungsabstand gewählt. Dabei bestehen drei Möglichkeiten für die Belichtung:

1. Softkontakt-Belichtung: Der Wafer wird ohne Kontakt (Proximity-Belichtung) mit der Maske belichtet. Der Belichtungsabstand kann in Mikrometerschritten durch das gewählte Programm eingestellt werden.
2. Hartkontakt-Belichtung: Dabei wird der Chuck im Abstand von wenigen Mikrometern an die Maske gebracht, so dass der Wafer fest an die Maske gedrückt wird. Zur Belichtung wird das Vakuum im Chuck abgeschaltet und Stickstoff zwischen Chuck und Wafer eingeblasen.
3. Vakuumkontakt-Belichtung: Bei dieser Belichtungsart wird der Wafer nach der Justage an die Maske herangefahren und das Vakuum im Chuck abgeschaltet. Die Vakuumsaugzeit ist so bemessen, dass Maske und Wafer in Kontakt sind. Diese Belichtungsvariante bietet die bestmögliche Auflösung da Abscheidungsfehler durch Beugungseffekte minimiert werden, führt aber zu Maskenverschleiß.

5.2.3 Ätzanlage

Für das Ätzen von Startschichten wird bei der Herstellung des Wirbelstromsensors die Ionstrahlanlage der ehem. Firma Commonwealth Scientific Corp. (Alexandria, USA) eingesetzt (Bild 5.11). Ein solcher Ätzprozess beruht auf der Wechselwirkung von beschleunigten Gasionen mit Festkörperoberflächen. Die Vorteile dieses Verfahrens bestehen in der guten Steuerbarkeit und der hohen Präzision, die im Bereich von Nanometern liegen kann.

Das Prinzip des Ionenstrahlätzens bzw. der Ionenstrahlbeschichtung basiert auf dem Beschuss eines Substrates mit energiereichen Ionen oder Neutralteilchen, die aus einer separaten Ionenquelle extrahiert werden. Die eingesetzte Anlage besitzt eine Breitstrahlionenquelle vom Kaufmann-Typ. Die 12 cm-Quelle wird beim Ätzprozess eingesetzt und befindet sich auf der Höhe des Substrathalters. Der Prozess findet im Vakuum statt, zu dessen Erzeugung die Anlage mit zwei Pumpen ausgerüstet ist.



2005 imt 5017-038

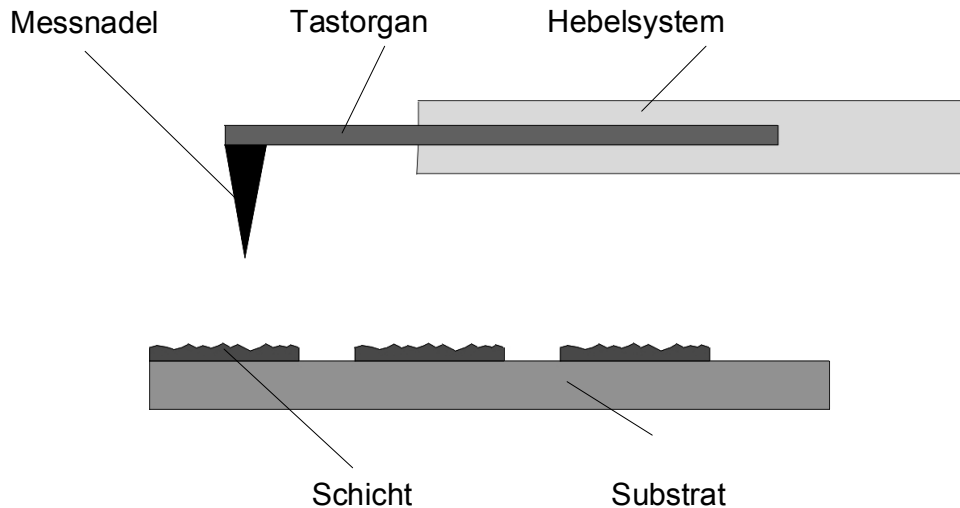
Bild 5.11: Ätzanlage

5.3 Messtechnik

5.3.1 Topographievermessung

5.3.1.1 Tastschnittverfahren

Zur Schichtdickenbestimmung wird auf dem Substrat eine Stufe zwischen einem unbeschichteten und einem beschichteten Bereich mit einer Abtastnadel abgefahren und die Messung elektronisch ausgewertet (Bild 5.12). Die Messeinrichtung besteht aus dem eigentlichen Messgerät und einem PC mit Handhabungs- und Messprogramm.

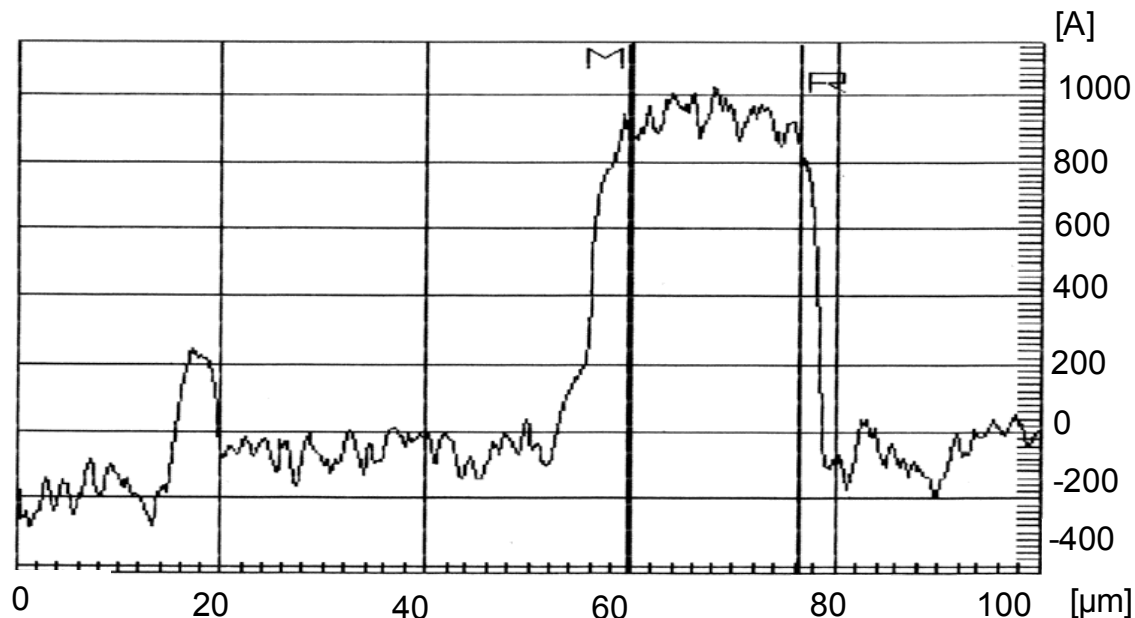


2005 imt 5017-039

Bild 5.12: Messprinzip des DekTak-Profilometers

Der Wafer wird so positioniert, dass eine geeignete Stufe im Verfahrweg der Nadel liegt, dann kann die Messung durchgeführt werden. Auf dem Monitor wird in einem Diagramm die vertikale Nadelbewegung über dem Verfahrweg aufgezeichnet, wobei die Probenebene zum Verfahrweg leicht geneigt sein kann.

Zwar ist das Auswertungsprogramm in der Lage, einen gewissen Neigungswinkel zu kompensieren, doch sollte darauf geachtet werden, dass die Probe einigermaßen waagerecht liegt. Der Neigungswinkel der Probe kann per Handrad verstellt werden. Das gemessene Profil zeigt das Bild 5.13.

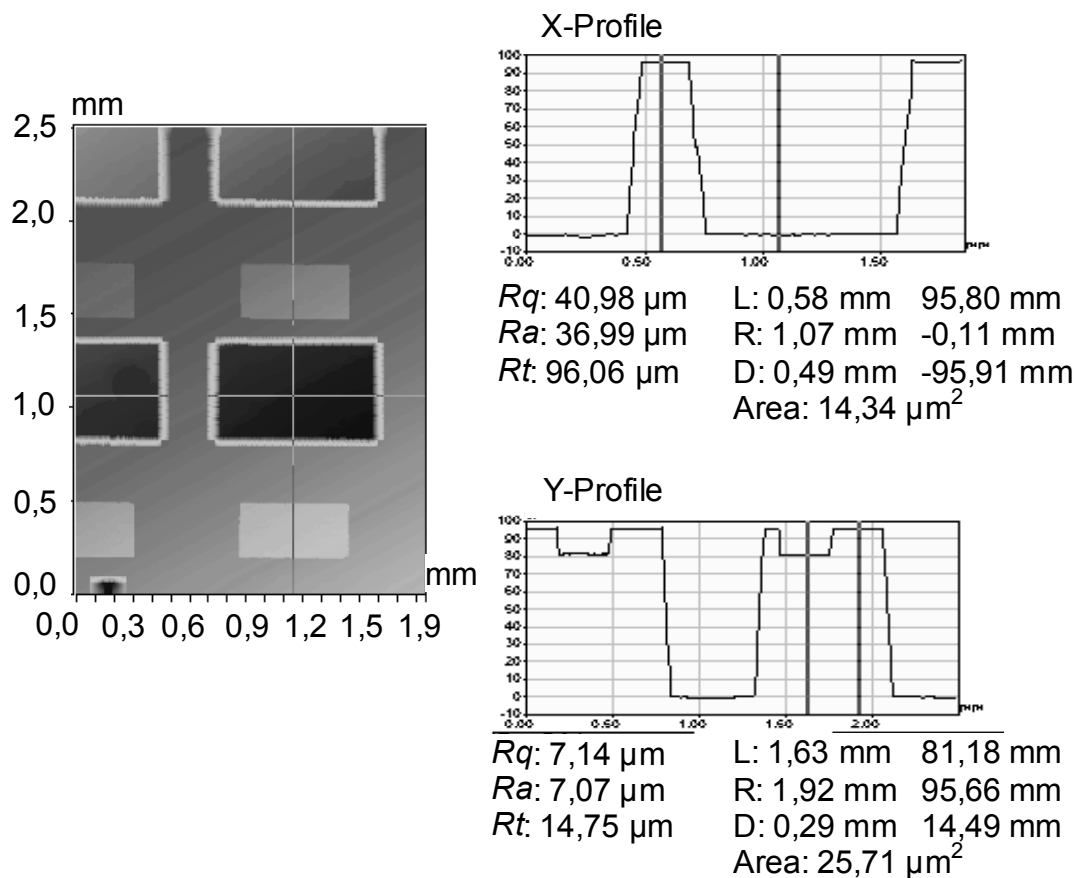


2005 imt 5017-040

Bild 5.13: Gemessenes Profil bei der Messung mit dem Tastschnittgerät

5.3.1.2 Weißlichtinterferometer (WyKo)

Das Weißlichtinterferometer ist ein Interferenzmikroskop, welches die dreidimensionale Vermessung der Oberflächentopographie ermöglicht.



2005 int 5017-041

Bild 5.14: Ergebnisse einer Messung mit dem Weißlichtinterferometer

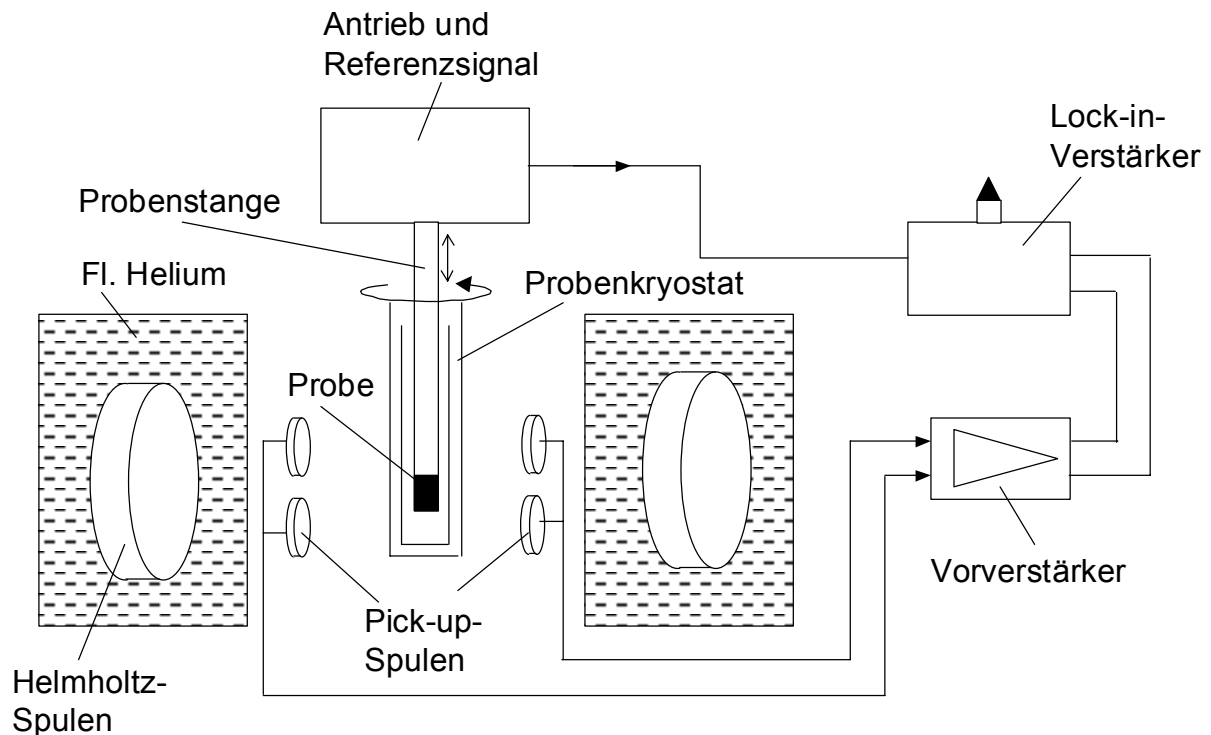
Die Messungen werden mittels Weißlicht im vertikal rasternden Interferometrie-Modus (VSI-*Vertical Scanning Interferometry*) durchgeführt [GAT97, GAT99]. Die optische Vergrößerung ist 40-fach. Mit dem Weißlichtinterferometer kann, wie mit dem Tastschnittgerät, die gesamte Struktur vermessen werden. Das Bild 5.14 zeigt die mit Weißlichtinterferometer gemessene Gruben-Struktur des Wirbelstromsensors.

5.3.2 Messung magnetischer Eigenschaften

Das Vibrationsmagnetometer (Vibration Simple Magnetometer-VSM) gehört zu den am weitesten verbreiteten Magnetometern. Bei Vibrationsmagnetometern wird die Induktionsspannung gemessen, die der zeitlich veränderliche Fluss einer sich bewegenden magnetischen (oder mit magnetischem Material beschichteten) Probe in stationären Spulen hervorruft. Bild 5.15 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Vibrationsmagnetometers.

Beim im Bild 5.15 gezeigten Aufbau eines Vibrationsmagnetometers befindet sich die Probe in einer Stange, die mit Hilfe eines Tauchspulenantriebs in vertikale Schwingungen versetzt wird. Die Probe bewegt sich mit einer Frequenz von 100 Hz

und einer Amplitude von 1,5 mm an den Messspulen (Pick-up-Spulen) vorbei. In diesen Spulen wird dabei eine Spannung induziert, die dem magnetischen Moment der Probe proportional ist und mit einer phasenempfindlichen Messtechnik sehr genau gemessen werden kann. Aufgrund seiner Empfindlichkeit kann das Vibrationsmagnetometer auch bei der Messung ultradünner ferromagnetischer Schichten eingesetzt werden.



2005 imt 5017-042

Bild 5.15: Prinzip eines Vibrationsmagnetometers

Im Vibrationsmagnetometer befindet sich die Probe im Feld zweier supra-leitender Spulen in Helmholtz-Anordnung. Da die Probe im Feld um ihre Längsachse drehbar ist, kann auch eine potenziell vorhandene magnetische Anisotropie der Probe aufgenommen werden.

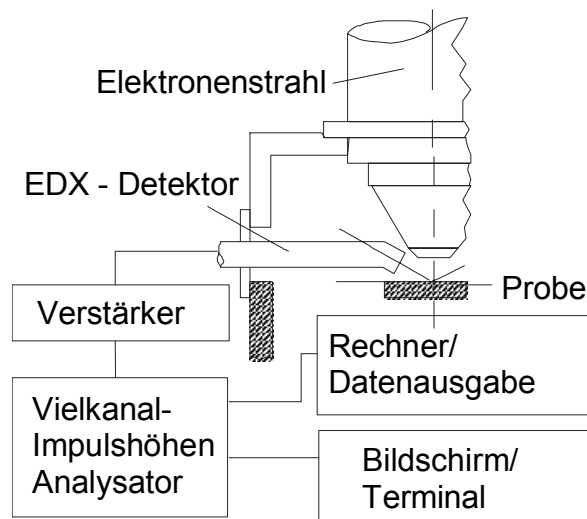
5.3.3 Messung der Materialeigenschaften

Die EDX-(Energy Dispersive X-ray Analysis)-Methode wird häufig in der Rasterelektronenmikroskopie (REM) eingesetzt. Über die Sekundärstrahlung wird die Röntgenstrahlung nach ihrem Energiespektrum analysiert.

Das verwendete Rasterelektronenmikroskop verfügt über eine Feld-emissionskathode, welche eine laterale Auflösung im Bereich von wenigen Nanometern ermöglicht. In das Gerät ist ein energiedispersives Spektroskop zur quantitativen Materialanalyse integriert. Die EDX-Analyse nutzt den Effekt, dass beim Beschuss von Materialien mit Atomen und Elektronen die freigesetzte Röntgenstrahlung für jedes Element eine charakteristische Wellenlänge hat. Zu

jedem Übergang gehört eine diskrete Energie. Die Energiedifferenz der am Elektronenübergang beteiligten Niveaus wird als Röntgenstrahlung freigesetzt.

Bei der EDX-Analyse nimmt ein Röntgendetektor die Strahlung auf und wandelt sie in Stromstöße um, die mit einem Pulsprozessor verstärkt und gemessen werden (Bild 5.16). Nachfolgend werden die Stromimpulse in einen Ventilkanspeicher weitergeleitet, entsprechend ihrer Amplitude sortiert und schließlich zu einem Röntgenspektrum zusammengesetzt. Die Messung wird mit einem Programm qualitativ und quantitativ ausgewertet.



2005 imt 5017-043

Bild 5.16: Schematische Darstellung der Rasterelektronenmikroskopie

Der große Vorteil der EDX-Analyse besteht in der Möglichkeit, sehr kleine Volumen analysieren zu können. Dabei sind Fehlstellen und grobe Verschmutzungen von der Messung ausgenommen. Ein weiterer Vorteil besteht in der hohen Arbeitsgeschwindigkeit und darin, dass keine Präparation der Probe vor (oder nach) der Messung nötig ist.

Der Nachteil dieser Messmethode liegt in der geringen Nachweisempfindlichkeit. Das bedeutet, dass ein Element mit niedriger Konzentration ($< 2\%$) nur sehr schwer oder gar nicht nachzuweisen ist. Ein weiterer Nachteil ist die Abhängigkeit des Messvorgangs von der Rauheit der Probe. Auch können bei aus mehreren Elementen zusammengesetzten Materialien die Energiewerte der einzelnen Elemente so nah beieinander liegen, dass sie nicht mehr unterschieden werden können.

6 Sensordesign

6.1 Entwurf des Sensors

Bei der Erarbeitung eines Entwurfes für den Wirbelstromsensor in Dünnschichttechnik wurden mehrere Varianten für den Sensoraufbau entwickelt und analysiert. Die Realisierung mancher Aufbauvarianten ist sehr aufwändig und benötigt viele Fertigungsschritte oder eine große Substratfläche.

Für den Aufbau von Wirbelstromsensoren kommen unterschiedliche Spulenausführungen in Frage. In der Mikrotechnologie werden am häufigsten planare Spiralspulen, Mäanderspulen und Helixspulen verwendet (Bild 6.1). Mäanderspulen sind dadurch charakterisiert, dass sich laufend die Windungsrichtung ändert. Dadurch wird die räumliche Ausrichtung von Domänen vermieden. Mäanderspulen werden vorwiegend zum Aufbau von Aktoren angewendet, während Spiralspulen und Helixspulen eher für den Sensoraufbau eingesetzt werden.

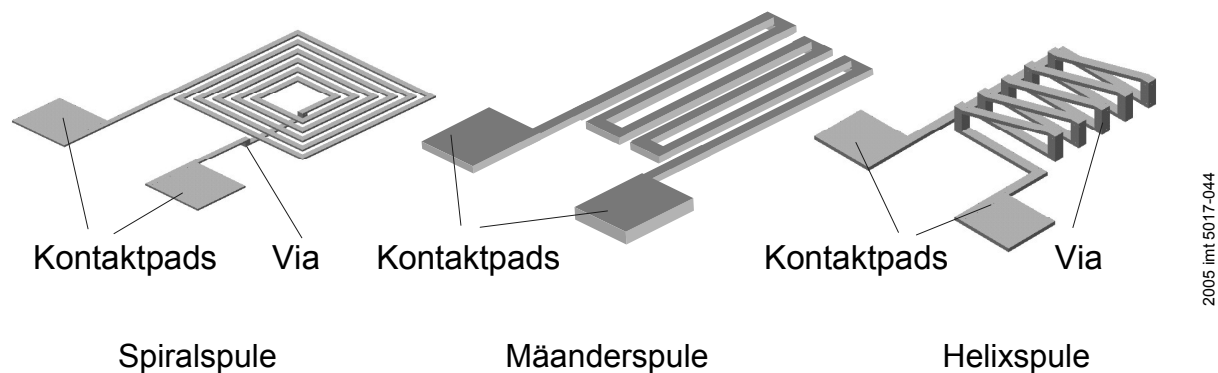


Bild 6.1: Spulenausführungen

Beim Vergleich zwischen Helixspule und Spiralspule werden mehrere Parameter ausgewertet. Magnetische Eigenschaften werden durch Simulationen bestimmt und sind in [ISW04] detailliert beschrieben. Das Ergebnis ist in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Tabelle 6.1: Qualitativer Vergleich zwischen Spiral- und Helixspule

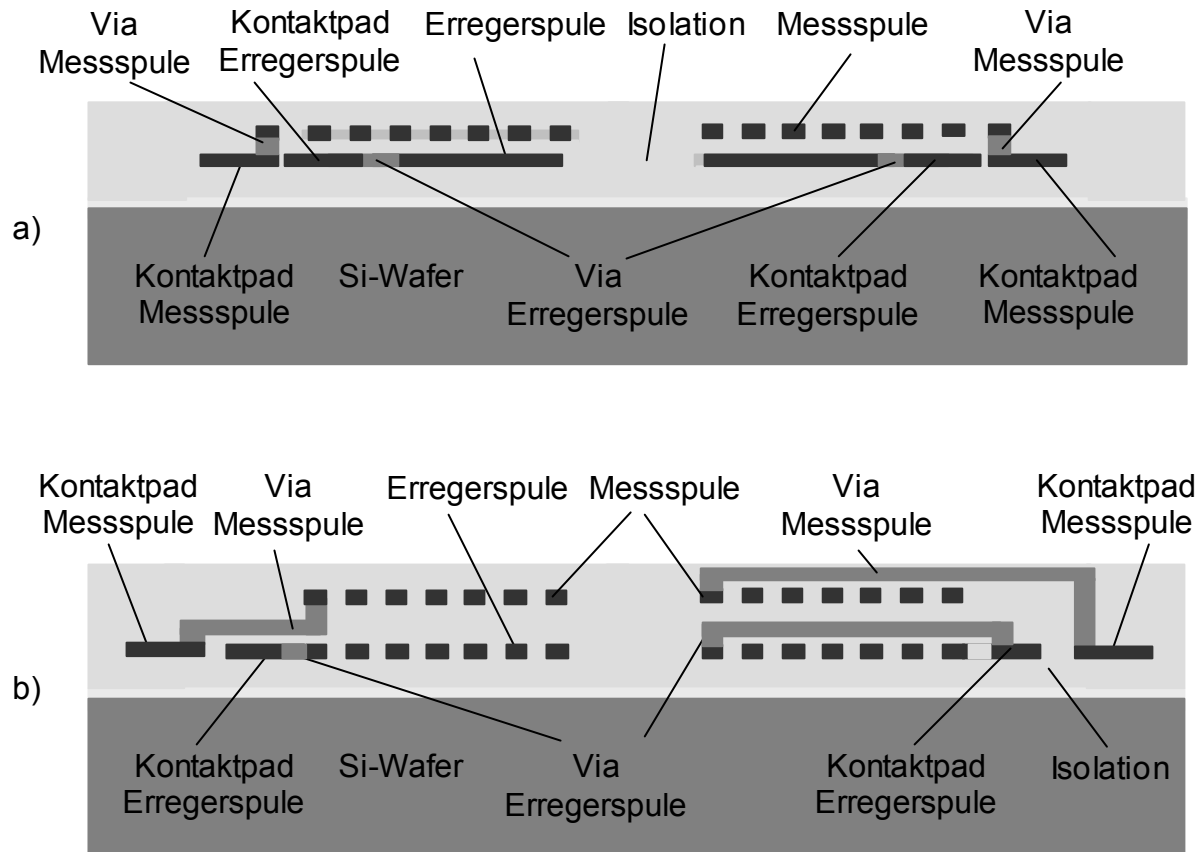
Aspekt/Kriterien \ Spulentyp	Planare Spiralspule	Helixspule
Benötigte Substratfläche	groß	gering
Aufbau in Dünnschichttechnik	einfach	schwierig
Elektrischer Widerstand	klein	sehr klein
Magnetische Eigenschaften	befriedigend	gut

Aufgrund des hohen Aufwands bei der Herstellung von Helixspulen in Dünnschichttechnik und der von der Fertigung von Dünnschichtköpfen vorhandenen Erfahrung, wurden planare Spiralspulen für die Fertigung des Wirbelstromsensors gewählt.

Die Bestimmung der optimalen Windungszahl und der Windungsbreite der Spulen erfolgte mittels der Finite-Element-Methode (FEM) Simulation. Dabei werden Spulengeometrie und -anordnung berechnet und analysiert. Die tatsächliche Sensorgeometrie wird damit einerseits durch Vorgaben aus den Simulationsergebnissen und andererseits aus prozesstechnischen Anforderungen bestimmt. Deswegen stellt das Spulendesign einen Kompromiss zwischen Simulationsanforderungen und der Möglichkeit eines möglichst einfachen Aufbaus in Dünnschichttechnik dar.

Beim Wirbelstromsensor ist ein niedriger Widerstand der Spulen wünschenswert. Bei kleineren Widerständen vermindern sich die Energieverluste, die zur Erwärmung des Sensors und zur Erhöhung der maximalen Strombelastbarkeit führen. Für den Wirbelstromsensor wurde ein zweilagiger Aufbau gewählt. Die erste Spulenlage, die Erregerspule, hat nur eine einzige Windung. Diese große Querschnittsfläche wurde ausgewählt, um höhere Ströme zu ermöglichen und einen geringeren elektrischen Widerstand zu gewährleisten. Auch von der technologischen Seite her hat dieser Entwurf mehrere Vorteile zu bieten. Einerseits ist es einfacher, eine größere Struktur aufzubauen und chemisch-mechanisch zu bearbeiten, andererseits ermöglicht ein solches Spulendesign einen Sensoraufbau mit einer kleinen Zahl von Prozessschritten. Bild 6.2 zeigt einen Querschnitt durch den doppelagigen Spulenaufbau: a) mit einwindiger Erregerspule, b) mit mehrwindiger Erregerspule. Beim Bildervergleich kann man erkennen, dass bei der ersten Variante nur drei Strukturebenen vorhanden sind, bei der zweiten Variante dagegen sind es schon sieben. Die Komplexität des Aufbaus und die Herstellungsdauer steigen mit der Erhöhung der Strukturebenen. Beim Aufbau mit einwindiger Erregerspule kann nicht nur der Materialverbrauch minimiert, sondern auch die Herstellungsdauer verringert werden.

Die zweite Spulenlage dient als Messspule. Deshalb besitzt sie mehrere Windungen mit kleinem Querschnitt. Der Abstand zwischen den einzelnen Windungen der Messspule wird möglichst klein gewählt, um den kapazitiven Widerstandswert in der Spule zu minimieren.



2005 imt 5017-045

Bild 6.2: Querschnitt durch doppellagigen Spulenaufbau a) mit einwindiger Erregerspule, b) mit mehrwindiger Erregerspule

Die Verwendung eines Nickel-Eisen-Kerns führt zu einer Konzentration des Sensor-Magnetfeldes. Um Hystereseverluste im Kern während der Magnetisierungszyklen zu vermeiden, muss der Kernwerkstoff eine geringe Koerzitivfeldstärke und eine große magnetische Permeabilität aufweisen. Außerdem sollte die Sättigungsflussdichte des Materials möglichst hoch sein, damit das Material auch bei hoher Durchflutung nicht in den magnetischen Sättigungsbereich gerät. Ferner ist ein hoher spezifischer Widerstand zur Unterdrückung der Wirbelstromverluste im Kern anzustreben. Das für den Kernaufbau ausgewählte Material NiFe 81/19 zeichnet sich durch eine hohe Permeabilität und ein geringes Koerzitivfeld sowie einen relativ hohen spezifischen Widerstand aus und ist deshalb als Material für den Kern hervorragend geeignet.

Ein weiterer wichtiger Punkt beim Entwurf des magnetischen Kerns ist die Festlegung der Kerngeometrie. Die Form des Kerns ist so zu gestalten, dass es einerseits zu einem geringen magnetischen Widerstand, andererseits aber auch zu einem geringen Wirbelstromverlust im Kern führt. Der magnetische Kern besteht aus einem unteren Kernteil und drei Polen und ist in E-Form aufgebaut. Der Abstand zwischen den Spulen und den Polstrukturen ist möglichst klein gehalten, um eine bessere magnetische Kopplung zwischen den Spulen zu erzielen und das magnetische Feld in das Material zu fokussieren [ISW05].

Bei der Festlegung des Sensordesigns stellte sich heraus, dass ein planarer Aufbau des Sensors einen Nachteil mit sich bringt, weil bei der Kontaktierung eine sogenannte Brücke entsteht. Diese Brücke wird durch Biegung von Draht beim Bonden gebildet und erreicht bis zu 100 μm Höhe. Da bei der Messung mit Wirbelstromsensoren der Abstand zwischen Sensor und Messobjekt eine erhebliche Rolle spielt und möglichst weit (zwischen $<10 \mu\text{m}$ bis zu 1 mm) variiert werden sollte, muss eine Lösung zur Vermeidung der Brücke gefunden werden.

Drei Varianten von Kontaktierung sind möglich. Als Erstes wird eine rückseitige Kontaktierung betrachtet, wobei die Zuleitungen zwischen den Spulen und Kontaktpads auf der Seite der Wafers liegen. Da die bei der Kontaktierung gebildeten Brücken auf der Rückseite der Wafer liegen, stören sie nicht bei der Abstandseinstellung zwischen Sensor und Messobjekt.

Bei der zweiten Variante werden die Kontaktpads ebenfalls auf der Rückseite der Wafer platziert. Die Zuleitungen zwischen den Spulen und Pads liegen in Löchern, die mittels Laserstrahl hergestellt und mit Leitermaterial galvanisch gefüllt werden.

Bei der dritten Variante liegen die Kontaktpads auf der Vorderseite in speziell dafür vorgesehenen Vertiefungen (Gruben). Diese Gruben werden durch nasschemisches Ätzen hergestellt und haben eine Tiefe von 100 μm . Bei dieser Variante entstehen die Brücken in Vertiefungen und nehmen somit keinen Einfluss auf den Abstand zwischen dem Sensor und Messobjekt.

Alle drei Varianten sind in Tabelle 6.2 zusammengefasst und miteinander verglichen. Betrachtet werden Komplexität bei der Fertigung, erzielbare Qualität der Oberfläche für Kontaktpads und Zuleitungen, Kosten, der Zeitaufwand beim Aufbau sowie die Möglichkeit, den Prozess am imt durchzuführen.

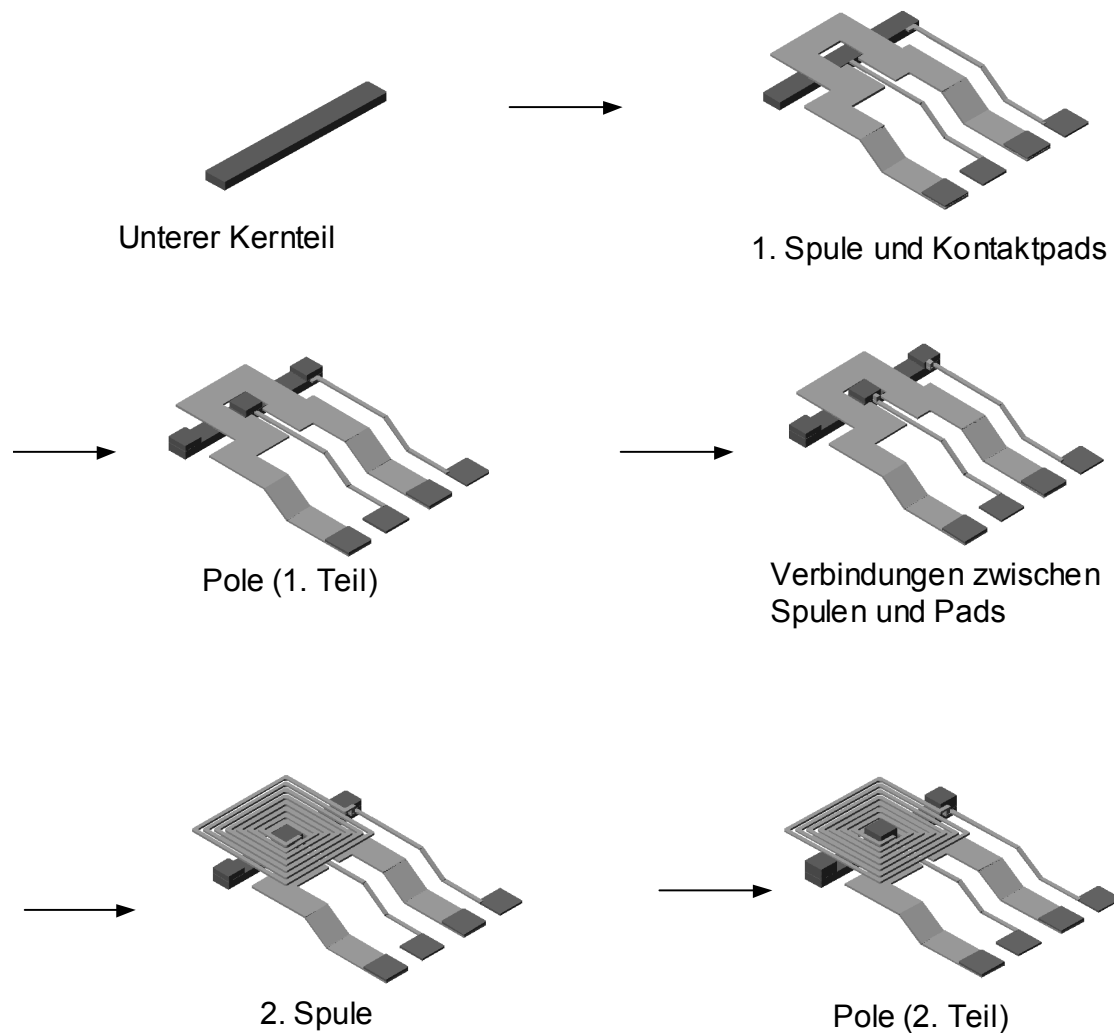
Tabelle 6.2: Gegenüberstellung der drei Varianten der Kontaktierung

Kriterium \ Variante	Seitlich	Durchkontaktierung	Grubenherstellung
Komplexität	hoch	mittel	gering
Oberflächenqualität	mittel	gering	hoch
Platzbedarf	gering	gering	mittel
Zeitaufwand	hoch	mittel	gering
Kosten	mittel	hoch	niedrig
Herstellung am imt	möglich	nicht möglich	nicht möglich

Der Vergleich der Varianten zeigt, dass der Aufbau des Kontaktpads in Gruben die größten Vorteile hat; deshalb wird diese Variante zum Aufbau des Wirbelstromsensors eingesetzt.

6.2 Strukturauslegung

Der Wirbelstromsensor besteht aus mehreren Schichtsystemen und weist einen planaren Gesamtaufbau auf. Auf einem Substrat werden nacheinander der untere Kernteil, die Spulenlagen und schließlich Pole in Einzelschichten erzeugt (Bild 6.3).



2005 imt 5017-046

Bild 6.3: Schritte bei der Sensorherstellung

Bei der Herstellung des Wirbelstromsensors werden zuerst zwei Arten von Gruben in die Si-Oberfläche geätzt. Als erstes werden die Kerngruben und dann die Kontaktpadgruben hergestellt. Auf der so strukturierten Substratoberfläche wird eine Isolationsschicht der Dicke 1 μm aufgetragen. Diese Schicht dient zur elektrischen Isolierung zwischen dem Bauteil und den Funktionsschichten des Sensors. Nach der Substratisolierung folgt die Herstellung des unteren Kernteils (siehe Bild 6.3). Der Magnetkern hat eine Gesamtlänge von 410 μm und wird E-förmig aus

weichmagnetischem Nickel-Eisen galvanisch hergestellt. Dafür wird zuerst eine ganzflächige Startschicht aus Chrom als Haftschrift und anschließend eine Schicht aus Nickel-Eisen 200 nm dick aufgesputtert. Nach der galvanischen Abscheidung des unteren Kernteils werden diese beiden Schichten durch Ionenstrahlätzen entfernt, sofern sie noch frei liegen. Die Strukturhöhe des unteren Kernteils beträgt 15 μm . Die Isolation der Strukturen erfolgt durch Aufschleudern und Strukturieren von SU-8. Anschließend werden die eingebetteten Strukturen mit CMP planarisiert. Die Oberfläche des Kerns wird durch eine 2 μm dicke SU-8-Schicht isoliert; die Öffnungen für die Pole bleiben dabei frei. Sie werden stufenweise gleichzeitig mit den Spulenlagen hergestellt und isoliert. Der Querschnitt eines Pols beträgt 50 μm x 20 μm .

Die Spulen werden doppellagig ausgeführt und über dem Kern positioniert. Wie bereits erwähnt, haben die beiden Spulen unterschiedliche Breiten und Windungszahlen. Die Erregerspule hat nur eine einzige Windung mit einem Querschnitt von 70 μm x 5 μm . Die Kontaktpads für beide Spulen werden gleichzeitig mit der ersten Spulenlage galvanisch erzeugt. Hierdurch ist es möglich, den Sensor mit nur zwei Leitungsebenen aufzubauen. Die Messspule besitzt mehrere Windungen bei kleinerem Querschnitt. Die Messspule hat einen Querschnitt von 10 μm x 5 μm . Die Abmessungen der Kontaktpads betragen 100 μm x 100 μm bei einem Abstand von 70 μm zwischen den Pads. Die Verbindung zwischen den Kontaktpads und der zweiten Spulenlage erfolgt durch Vias, die einen Querschnitt von 10 μm x 2 μm haben.

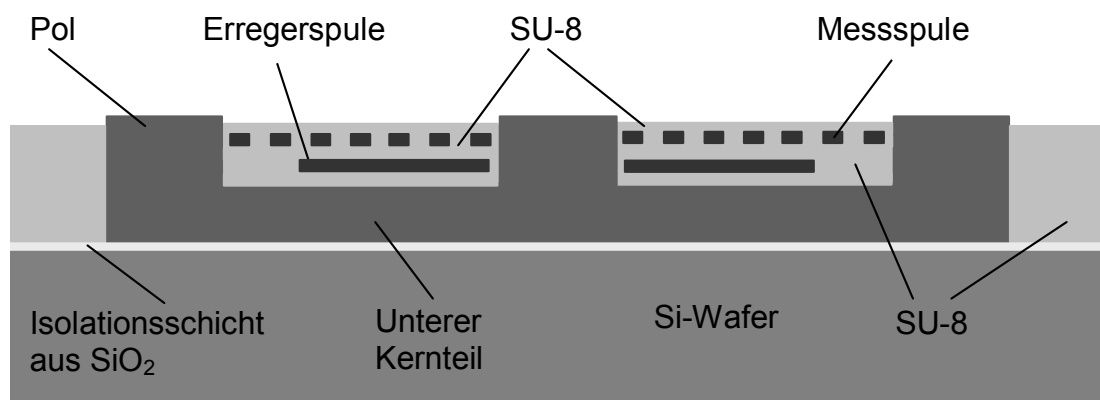


Bild 6.4: Querschnitt durch einen Wirbelstromsensor

Beide Spulen werden galvanisch auf einer Startschicht aus Chrom (40 nm) und Kupfer (200 nm) gefertigt. Die Isolation erfolgt ebenfalls durch Einbettung der Spulenstruktur in einer SU-8-Schicht mit nachfolgender Strukturierung. Bild 6.4 stellt einen Querschnitt durch den Wirbelstromsensor dar. Die lateralen Dimensionen des gesamten Wirbelstromsensors betragen rund 450 μm x 700 μm (Bild 6.5). Alle Strukturen des Sensors werden durch galvanische Prozesse hergestellt, die Startschichten aufgesputtert und nach der Galvanik durch Ionenstrahlätzen entfernt.

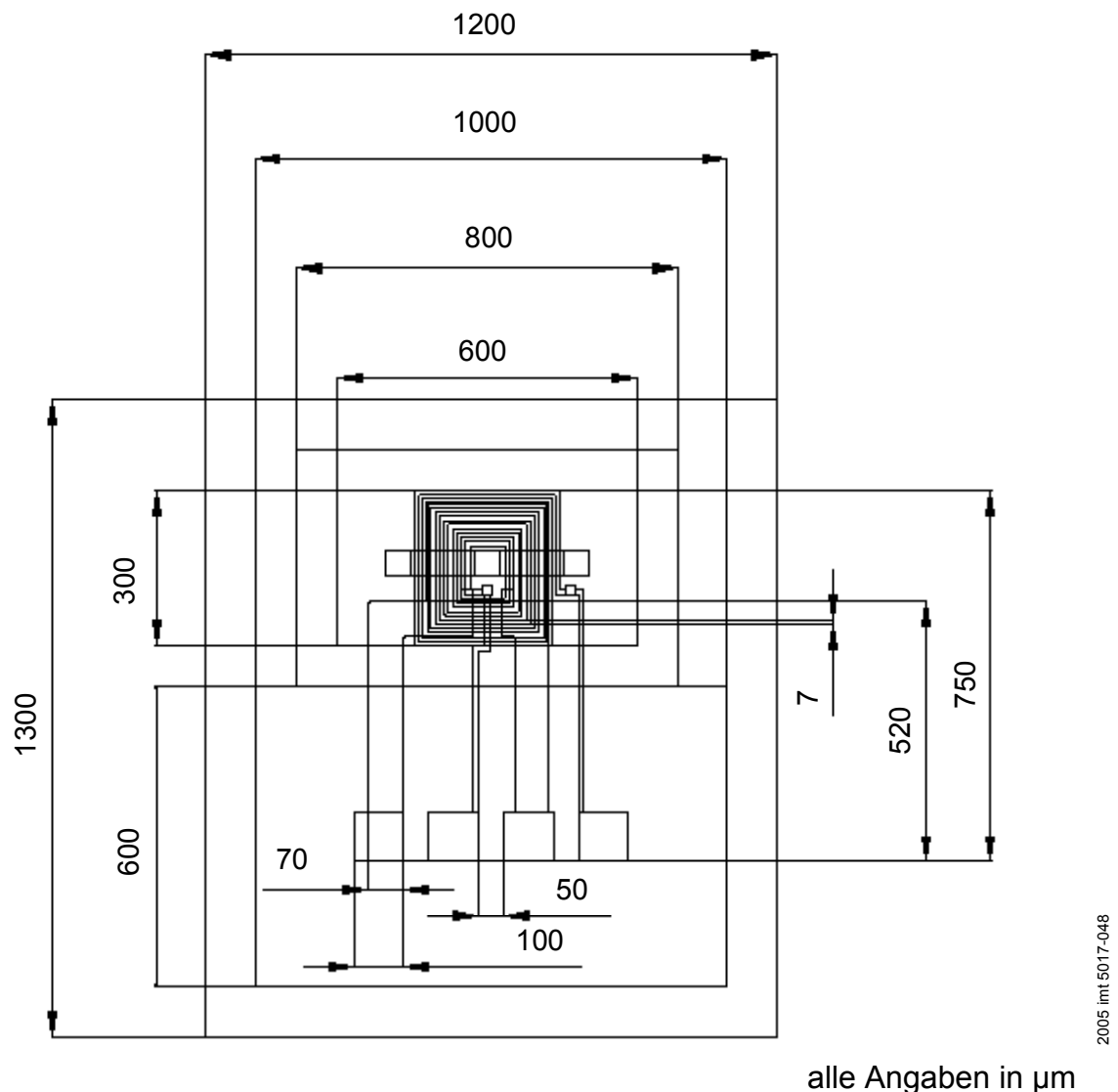


Bild 6.5: Abmessungen des Wirbelstromsensors

Vor Beginn der Fertigung der Wirbelstromsensoren wurden die Werkstoffe für den Aufbau des magnetischen Kerns, der Spulen und der Isolationsschichten festgelegt (Tabelle 6.3). In Kapitel 2.4 wurden Materialien theoretisch untersucht, die einerseits in der Mikrotechnologie zur Verfügung stehen, andererseits die besten Eigenschaften für die Herstellung von dünnfilmtechnologischen Bauteilen aufweisen und sich gut strukturieren lassen.

Für die Herstellung des magnetischen Kerns kommt Nickel-Eisen 81/19 zum Einsatz, das gute magnetische Eigenschaften besitzt. Die Spulenstrukturen werden aus Kupfer hergestellt. Der Vorteil von Kupfer liegt in seinem niedrigen spezifischen Widerstand. Als Isolationsschichten werden Aluminiumoxid und gehärtetes Photoharz SU-8 eingesetzt. Auch zur Einbettung von Sensorstrukturen ist dieses Photoharz gut geeignet [KOLM02, LOR98].

Tabelle 6.3: Werkstoffe und Technologien für die Wirbelstromsensorherstellung

Material	Anwendung	Beschichtungsverfahren	Strukturierungsverfahren
NiFe 81/19	Herstellung des Kerns	Kathodenzerstäubung, Galvanische Abscheidung in Mikroform	Photolithographie, Ionenstrahlätzen
Cu	Herstellung von Spulen, Vias, Kontaktpads	Kathodenzerstäubung, Galvanische Abscheidung in Mikroform	Photolithographie, Ionenstrahlätzen
Photoresist	Resistmaske für Galvanik	Aufschleudern	Photolithographie
SU-8	Einbettung von Strukturen, Isolierung	Aufschleudern	Photolithographie
Al ₂ O ₃	Isolationsschicht	Kathodenzerstäubung	Lift-off

Die Fertigung des Wirbelstromsensors umfasst unterschiedliche Prozesse wie Beschichtung, Photolithographie, Galvanik und Abtragsprozesse. Die Wahl der Strukturierungsverfahren wird durch das Material und die Abmessungen des Bauteilelements bestimmt (siehe Tabelle 6.3). Ferner spielt die Kompatibilität der einzelnen Schritte in der gesamten Fertigungsfolge eine wichtige Rolle.

Gesputterte dünne metallische Schichten aus NiFe und Au sind als Startschichten vorzusehen, da die Sensorstrukturen mindestens 5 µm hoch sind und wegen der höheren Abscheiderate galvanisch hergestellt werden sollten. Die unterschiedlichen AZ Photoresists sind zur Herstellung von Mikroform für die galvanische Abscheidung und Lift-off-Prozess, SU-8 für die Einbettung und Isolation vorgesehen.

Nach der Auslegung der Strukturelemente des Sensors, deren Abmessungen und Bestimmung der Prozessfolge werden photolithographische Masken für die Strukturierung der Photoresists gezeichnet. Das Maskendesign wird im Zeichnungsprogramm AutoCAD erstellt. Danach werden die Dateien in ein geeignetes Format konvertiert. Die Masken werden am imt mit Hilfe einer direktschreibenden Laserlithographieanlage hergestellt

Tabelle 6.4 stellt alle Maskenschritte vor. Sie zeigt einerseits eine Draufsicht der jeweiligen Maske, andererseits eine isometrische Zeichnung in Fertigung befindlichen Bauteils nach Durchführung des entsprechenden Maskenschritts.

Tabelle 6.4 (Teil 1): Maskenschritte

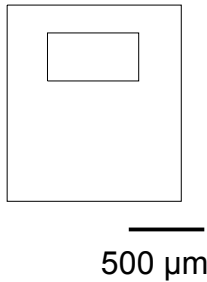
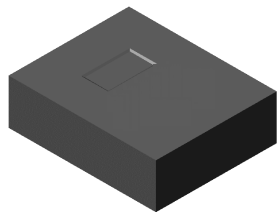
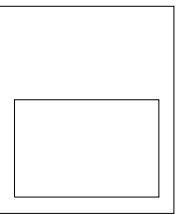
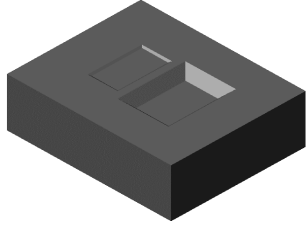
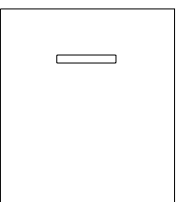
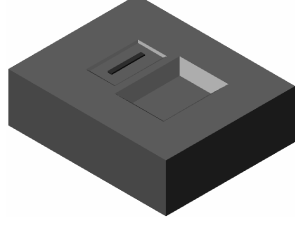
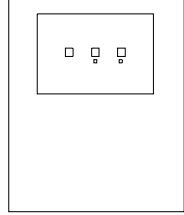
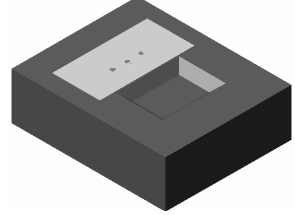
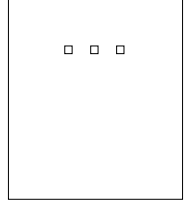
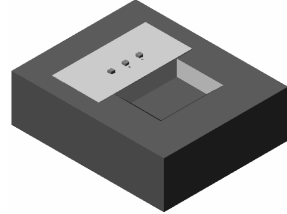
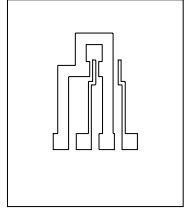
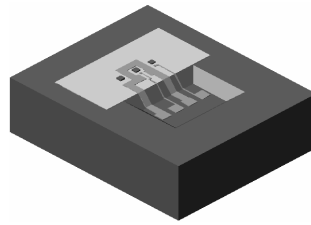
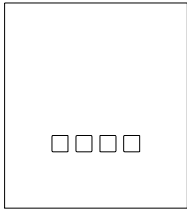
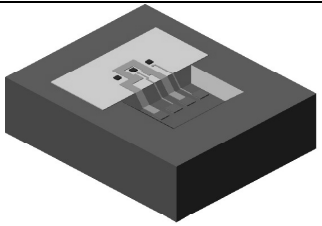
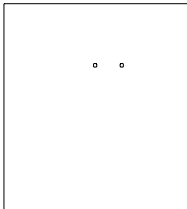
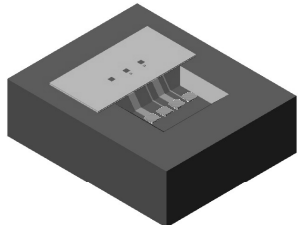
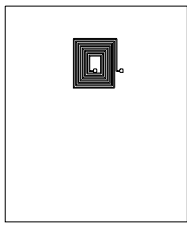
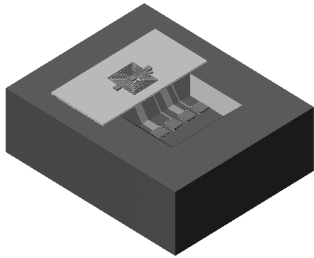
Maske	Anwendung	Aufbau des Sensors
	Maske 1 Herstellung von Kerngruben	
	Maske 2 Herstellung von Padgruben	
	Maske 3 Herstellung des unteren Kernteils	
	Maske 4 Isolation des unteren Kernteils	
	Maske 5 Herstellung der Pole	
	Maske 6 Herstellung der ersten Spulenlage	

Tabelle 6.4 (Teil 2): Maskenschritte

	<p>Maske 7 Herstellung von Kontaktpads</p>	
	<p>Maske 8 Herstellung von Vias</p>	
	<p>Maske 9 Herstellung der zweiten Spulenlage</p>	

7 Sensorfertigung

Bei der Entwicklung und Fertigung des Wirbelstromsensors in Dünnschichttechnik kommt eine Kombination aus unterschiedlichen dünnfilmtechnischen Prozessen, wie Beschichtungs-, Photolithographie- und Abtragsprozesse, zum Einsatz.

Für den richtigen Sensoraufbau müssen optimale Eigenschaften des magnetischen Materials erzielt werden. Unabhängig von den Sensorstrukturen wird zuerst eine Untersuchung der Sensorschichten vorgenommen. Die optimale NiFe-Zusammensetzung wurde bei Untersuchungen der magnetischen Eigenschaften der hergestellten Schichten ermittelt und für den Aufbau festgelegt. Da als Beschichtungsverfahren die galvanische Abscheidung gewählt wurde, sind die magnetischen Eigenschaften und die Zusammensetzung vom Abscheidematerial und von den Prozessparametern abhängig. Der Einfluss der Abscheidungsgeschwindigkeit wurde mit Hilfe von VSM-Messungen (magnetische Eigenschaften) und EDX-Analysen (Zusammensetzung) bewertet, woraus die optimalen Prozessparameter für den Herstellungsprozess festgelegt wurden.

Beim Aufbau des Wirbelstromsensors wurden drei Photolacksorten mit unterschiedlichen Schichtdicken und Auflösungen verwendet: zwei davon für galvanische Prozesse und der dritte Photoresist zur Einbettung. Für die Herstellung höherer Strukturen wurde der Photoresist AZ 9260 mit einer Auflösung von 4 bis 5 µm eingesetzt (siehe Tabelle 7.1).

Tabelle 7.1: Eingesetzte Photoresists

Resist	Viskosität [mm ² /s], bei 25°C	Wellenlängenbereich der höchsten Lichtempfindlichkeit [nm]	Nominale Schichtdicke [µm]
AZ 5214	24	310-420	1,15-1,6
AZ 9260	440	310-440	5,0-7,2
SU-8 2005	350	350-400	3-10
SU-8 25	2.525	350-400	15-40

Für die Spulen-, Leiter- und Viaherstellung wird der Photolack AZ 5214 verwendet. Dieser Photoresist besitzt eine hohe spektrale Empfindlichkeit und eine Auflösung, die bis in den Mikrometerbereich reicht. Neben der Positivstrukturierung kann dieser Photoresist auch für die Negativstrukturierung (durch einfache Bildumkehr) verwendet werden (sogenannter Reversal-Prozess).

7.1 Aufbauvariante des Wirbelstromsensors

Beim Herstellungsprozess des Wirbelstromsensors entstehen drei unterschiedliche Aufbauvarianten. Diese Aufbauvarianten werden bei den Untersuchungen von Aufbauelementen oder zum Vergleich der Varianten (mit und ohne magnetischen Kern) verwendet. Die Varianten des Wirbelstromsensors unterscheiden sich in der Zusammenstellung der einzelnen Bauteilelemente. Die Tabelle 7.2 gibt eine Übersicht über die Varianten des Sensors.

Tabelle 7.2: Varianten des Wirbelstromsensors

Aufbauelement	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Grube	-	-	x	x
Kern	-	x	-	x
Erregerspule	x	x	x	x
Messspule	x	x	x	x

7.2 Fertigungsschritte für den Aufbau des Wirbelstromsensors

In den Tabellen 7.3 bis 7.9 sind Einzelschritte für die Fertigung des Sensors aufgeführt. Die Fertigung jedes Elements bedarf eines eigenen Maskenschritts. Die bei den Maskenschritten verwendeten Masken werden zum Teil mehrfach im Herstellungsprozess eingesetzt. Die Fertigung aller Sensorteile umfasst 39 Schritte, darunter die Reinigung der Wafer, Photolithographie, Sputtern, Galvanik und Ätzen. Beim Aufbau des Wirbelstromsensors werden neun photolithographische Masken benötigt.

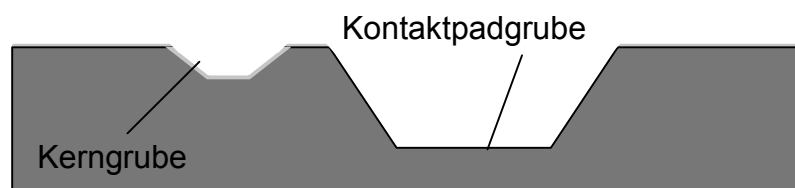
Die Sensorelemente werden auf einem 1 mm dicken, mit SiO_2 und Si_3N_4 beschichteten Siliziumsubstrat aufgebaut. Das Siliziumsubstrat wird zuerst mit Gruben für den unteren Teil des magnetischen Kerns und die Kontaktpads versehen. Danach werden Gruben für die Kontaktpads auf der Siliziumoberfläche geätzt (Tabelle 7.3). Beide Grubenvariationen fertigt man durch nasschemisches Ätzen. Sie haben einen Flankenwinkel von jeweils $54,7^\circ$.

Für eine galvanische Abscheidung des magnetischen Kerns ist eine Startschicht und eine strukturierte Photoresistmaske auf der Waferoberfläche notwendig. In diese Resistform werden die NiFe-Kernstrukturen abgeschieden.

Nach der Galvanik wird die Photoresistschicht mit Aceton entfernt und die Startschicht abgetragen. Anschließend wird der Kern in SU-8 eingebettet und damit zugleich isoliert und planarisiert (Tabelle 7.4).

Tabelle 7.3: Fertigungsschritte zur Herstellung von Gruben

Prozess Nr.	Prozessschritt	Bauteil	Materialien/Werkst.	Dicke [μm]
1	Reinigung mit Aceton, Isopropanol	Wafer	Aceton, Isopropanol	-
2	Photolithographie	Grube (Kern)	AZ 5214	1,4
3	Ätzen (trocken)	Grube (Kern)	-	-
4	Ätzen (nasschemisch)	Grube (Kern)	KOH	
5	Beschichtung Si_2O_3		-	1
6	Photolithographie	Grube (Pads)	AZ 9260	20
7	Ätzen (trocken)	Grube (Pads)	-	-
8	Ätzen (nasschemisch)	Grube (Pads)	KOH	-
9	Waferreinigung		Aceton, Isopropanol	-



2005 imt 5017-049

Nach der Herstellung des unteren Kernteils werden die Pole aufgebaut. Zuerst wird nur ein Teil der Pole abgeschieden, um die Strukturhöhe später an den weiteren Strukturaufbau anpassen zu können (Tabelle 7.5).

Die erste Spulenlage wird auf einer Goldstartschicht in einer Photoresistform galvanisch aus Kupfer hergestellt und danach in einer Isolationsschicht aus SU-8 eingebettet. Beim Isolierungsprozess wird Raum für die Vias, Pole, Kontaktpads und Abstand zwischen den einzelnen Elementen freigelassen (Tabelle 7.6).

Die Schritte 27 bis 29 umfassen die Herstellung der Vias und Kontaktpads. Die Vias stellen die Verbindung zwischen den Zuleitungen zu den Kontaktpads und der zweiten Spulenlage her (Tabelle 7.7). Der Wirbelstromsensor besitzt zwei unterschiedliche Spulenlagen. Die zweite Spulenlage wird auf derselben Kupferstartschicht wie das Via galvanisch aufgebaut.

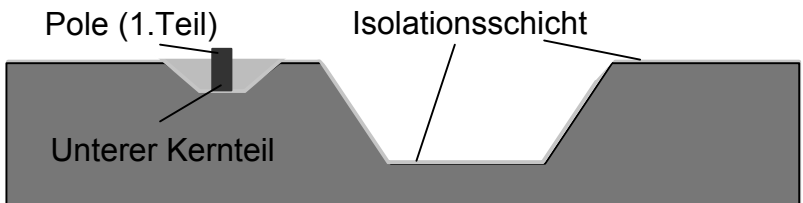
Tabelle 7.4: Fertigungsschritte zur Herstellung des unteren Kernteils und der Kerneinbettung

Prozess Nr.	Prozessschritt	Bauteil	Material/Werkstoff	Dicke [μm]
10	Isolationsschicht		Al_2O_3	1
11	Startschicht für Galvanik	Unterer Kernteil	Cr, NiFe	0,03; 0,2
12	Photolithographie	Unterer Kernteil	AZ 9260	20
13	Galvanik	Unterer Kernteil	NiFe 81/19	15
14	Ätzen der Startschicht			
15	Einbettung	Kerneinbettung	SU-8	20
16	Planarisierung	Gesamter Wafer		
17	Isolationsschicht	Kernisolation	SU-8	3

Nach der Spulenherstellung folgt die Verstärkung für die Kontaktpads aus einer Nickel- und einer Goldschicht (Tabelle 7.8).

Tabelle 7.5: Fertigungsschritte zur Herstellung des ersten Teils der Pole

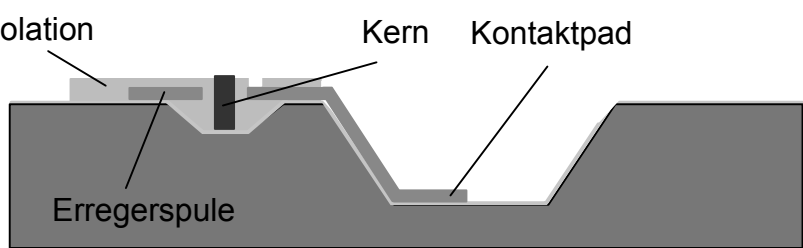
Prozess Nr.	Prozessschritt	Bauteil	Material/Werkstoff	Dicke [μm]
18	Startschicht für Galvanik	Pole (1.Teil)	Cr, NiFe	0,03; 0,2
19	Photolithographie	Pole (1.Teil)	AZ 9260	7
20	Galvanik	Pole (1.Teil)	NiFe 81/19	5
21	Ätzen der Startschicht	Gesamter Wafer		0,23



2005 imt 5017-051

Tabelle 7.6: Fertigungsschritte zur Herstellung Erregerspule und –isolation

Prozess Nr.	Prozessschritt	Bauteil	Material/Werkstoff	Dicke [μm]
22	Startschicht für Galvanik	Erregerspule	Cr, Cu	0,03; 0,2
23	Photolithographie	Erregerspule	AZ 9260	7
24	Galvanik	Erregerspule	Cu	5
25	Ätzen der Startschicht	Gesamter Wafer		0,23
26	Einbettung	Pole, Erregerspule	SU-8	7



2005 imt 5017-052

Tabelle 7.7: Fertigungsschritte zur Herstellung der Vias

Prozess Nr.	Prozessschritt	Bauteil	Material/Werkstoff	Dicke [μm]
27	Startschicht für Galvanik	Messspule, Via	Cr, Cu	0,03; 0,2
28	Photolithographie	Via	AZ 9260	5
29	Galvanik	Via	Cu	2

2005 imt 5017-053

Tabelle 7.8: Fertigungsschritte zur Herstellung der Messspule und Padverstärkung

Prozess Nr.	Prozessschritt	Bauteil	Material/Werkstoff	Dicke [μm]
30	Photolithographie	Messspule	AZ 9260	7
31	Galvanik	Messspule	Cu	5
32	Photolithographie	Padverstärkung	AZ 9260	30
33	Galvanik	Padverstärkung	Ni	2
34	Ätzen der Startschicht	Gesamter Wafer		0,23

2005 imt 5017-054

Für die Herstellung des zweiten Teils der Pole wird die selbe Startschicht wie für die zweite Spulenlage, die Vias und die Padverstärkung verwendet (Tabelle 7.9).

Nach der galvanischen Auffüllung der Resistform wird die Startschicht weggeätzt und die Strukturen in einer SU-8-Schicht eingebettet.

Tabelle 7.9: Fertigungsschritte zur Herstellung des zweiten Teils der Pole und der SU-8-Isolation

Prozess Nr.	Prozessschritt	Bauteil	Material/Werkstoff	Dicke [μm]
35	Startschicht für Galvanik	Pole (2.Teil)	Cr, NiFe	0,03; 0,2
36	Photolithographie	Pole (2.Teil)	AZ 9260	10
37	Galvanik	Pole (2.Teil)	NiFe 81/19	7
38	Ätzen der Startschicht	Gesamter Wafer		0,23
39	Einbettung, Isolation	Pole, 2. Spule	SU-8	10

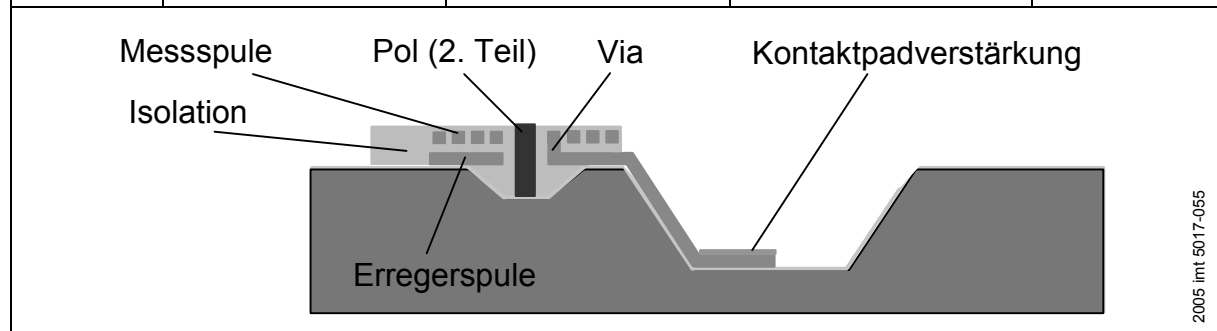
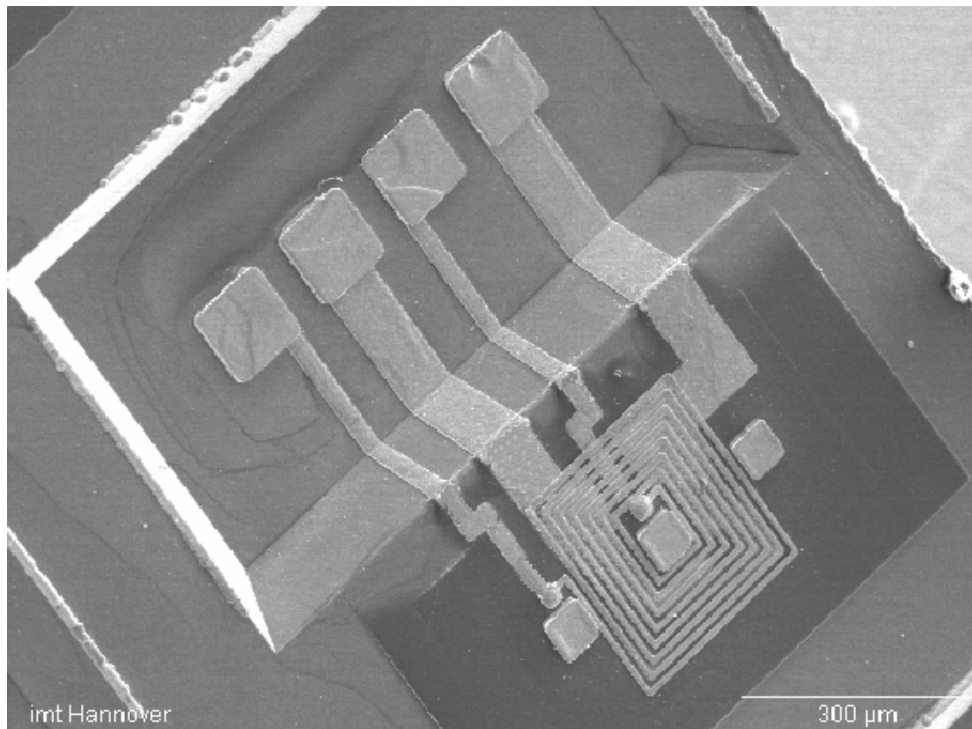


Bild 7.1 zeigt eine REM-Aufnahme des gefertigten dünnfilmtechnischen Wirbelstromsensors. Jede Spule besitzt zwei Anschlüsse für die spätere Kontaktierung.

Nach der Herstellung der Bauteile auf der Substratoberfläche erfolgt die Vereinzelung. Die Bauelemente sind sehr nah beieinander platziert, um möglichst viele Teile auf einem Wafer gleichzeitig herstellen zu können. Die Bauteile werden mittels eines Trennschleifverfahrens voneinander getrennt. Nach der Vereinzelung folgt das Aufkleben der einzelnen Bauteile auf eine Leiterplatte und die Kontaktierung in einem Bondprozess mit Golddrähten.

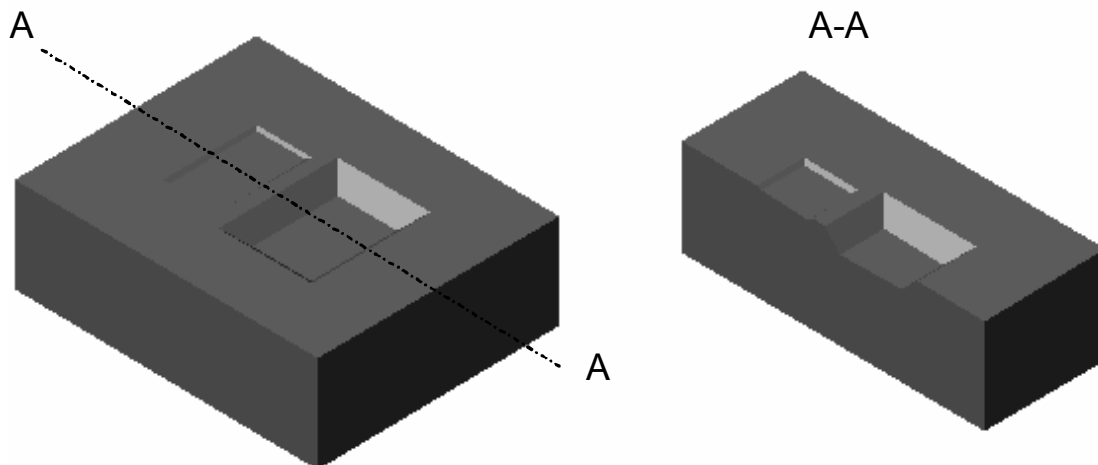


2005 imt 5017-056

Bild 7.1: REM-Aufnahme des fertigen Wirbelstromsensors (Variante 4)

7.2.1 Herstellung von Gruben

Der Herstellungsprozess von Gruben erfolgt in zwei Schritten (Bild 7.2).



2005 imt 5017-057

Bild 7.2: Gruben auf der Waferoberfläche

Zuerst werden die Kerngruben aufgebaut. Die Tiefe einer solchen Kerngrube beträgt 15 µm. Die Herstellung dieser Struktur beginnt mit dem Aufbringen der Photoresistschicht (1,5 µm dick) auf der Waferoberfläche, die photolithographisch strukturiert wird. Anschließend werden Siliziumnitrid- und Siliziumoxidschichten in

den Öffnungen abgetragen. Nach dem Ätzprozess wird die Photoresistmaske entfernt.

Die Wafer mit Maskierung aus Siliziumoxid und Siliziumnitrid werden dann an der TU Chemnitz nasschemisch in KOH-Lösung geätzt und nachfolgend mit 1 µm Siliziumoxid beschichtet. Der Prozessplan zur Herstellung der Gruben sieht wie folgt aus:

1. Photolithographie auf mit SiO_2 und Si_3N_4 beschichteten Siliziumwafern (imt)
2. Ätzen der SiO_2 - und Si_3N_4 -Schichten (imt)
3. Si-Ätzen der Kerngruben (TU Chemnitz)
4. Beschichtung der Oberfläche mit SiO_2 - und Si_3N_4 -Schichten (TU Chemnitz)
5. Photolithographie auf mit SiO_2 und Si_3N_4 beschichteten Siliziumwafern (imt)
6. Ätzen der SiO_2 - und Si_3N_4 -Schichten (imt)
7. Si-Ätzen der Kontaktpadgruben (TU Chemnitz)
8. Beschichtung der Oberfläche mit 1 µm Si_2O_3 (TU Chemnitz)

Bei der Herstellung von Öffnungen für die zweite Grubenart ist eine viel dickere Photoresistschicht nötig, da die Siliziumoxidschicht auf den bereits erzeugten Gruben nicht beschädigt werden darf. Deshalb wird bei der Belackung eine 20 µm dicke Photoresistschicht auf das Substrat aufgetragen. Bei solch dicken Photoresistschichten muss nach der Strukturierung zusätzlich eine Thermobehandlung durchgeführt werden, da die restlichen Gase und die Feuchtigkeit im Resist beim ersten Thermobehandlungsschritt nicht vollständig entfernt werden können. Diese restlichen Gase würden sonst beim Ätzprozess freigesetzt und zu einer Blasenbildung auf der Waferoberfläche und gleichzeitig zu einer Beschädigung der Siliziumoxidschicht führen. Die zusätzliche Thermobehandlung wird auf einer Heizplatte durchgeführt bei langsamem Erhöhen der Temperatur („Rampen“) von 50°C auf 150°C und anschließendem Abkühlen auf Raumtemperatur.

Nach der Herstellung von Öffnungen für die Padgruben wird die Resistschicht von der Oberfläche entfernt und der Wafer gründlich gereinigt.

Zur Überprüfung der Oberflächenbeschaffenheit wurden Untersuchungen mit einem Weißlichtinterferometer durchgeführt. Bild 7.3 zeigt beispielhaft eine Aufnahme der Grubenoberfläche. Bei der Vermessung der Gruben konnte eine mittlere Rauheit der Bodenoberfläche der Padgruben von ca. 0,05 µm gemessen werden.

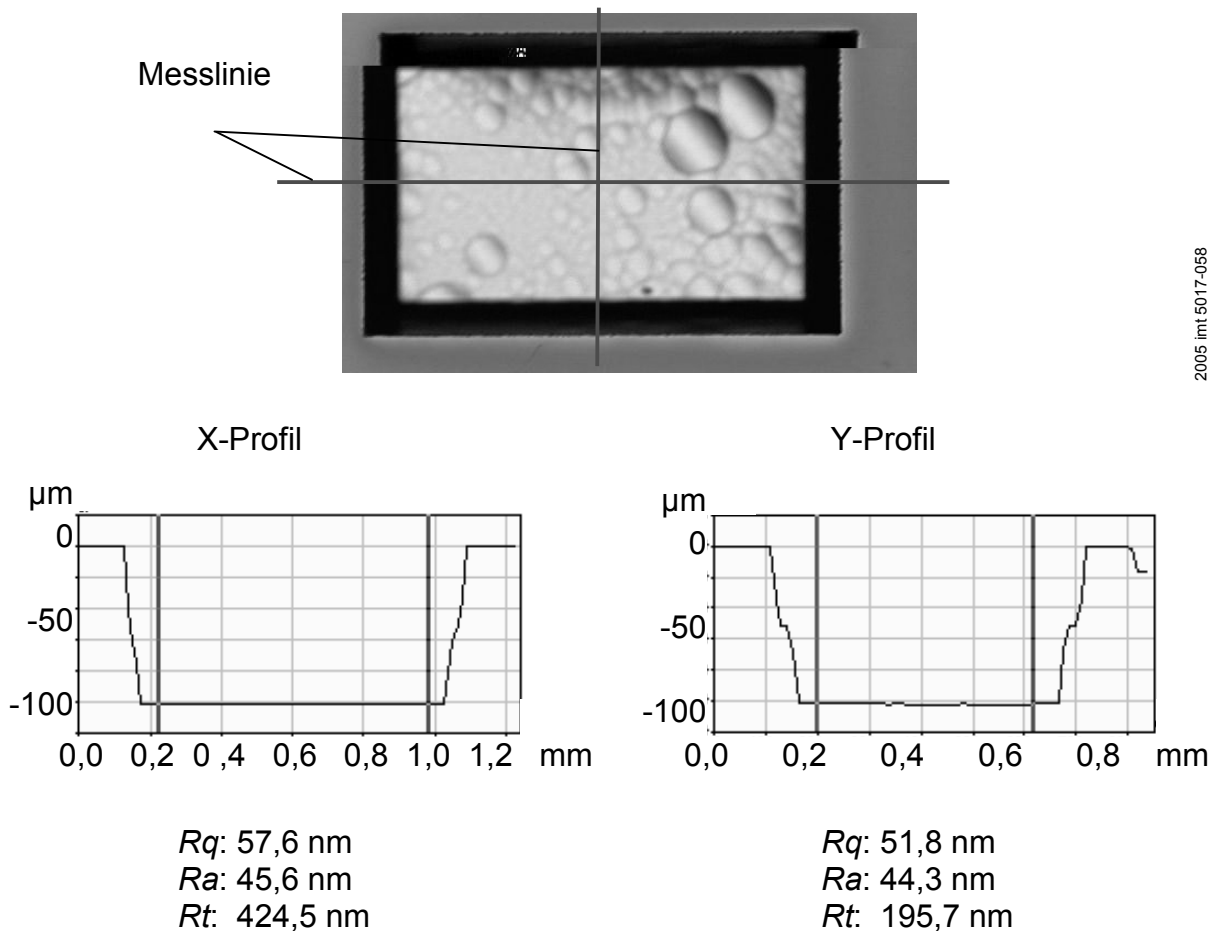


Bild 7.3: Vermessung der Grubenoberfläche

7.2.2 Herstellung des magnetischen Kerns

Der untere Kernteil wird in einer der 15 μm tiefen Si-Gruben aufgebaut, um keinen Höhenunterschied bei auf dem Kern aufliegenden Strukturen zu bekommen.

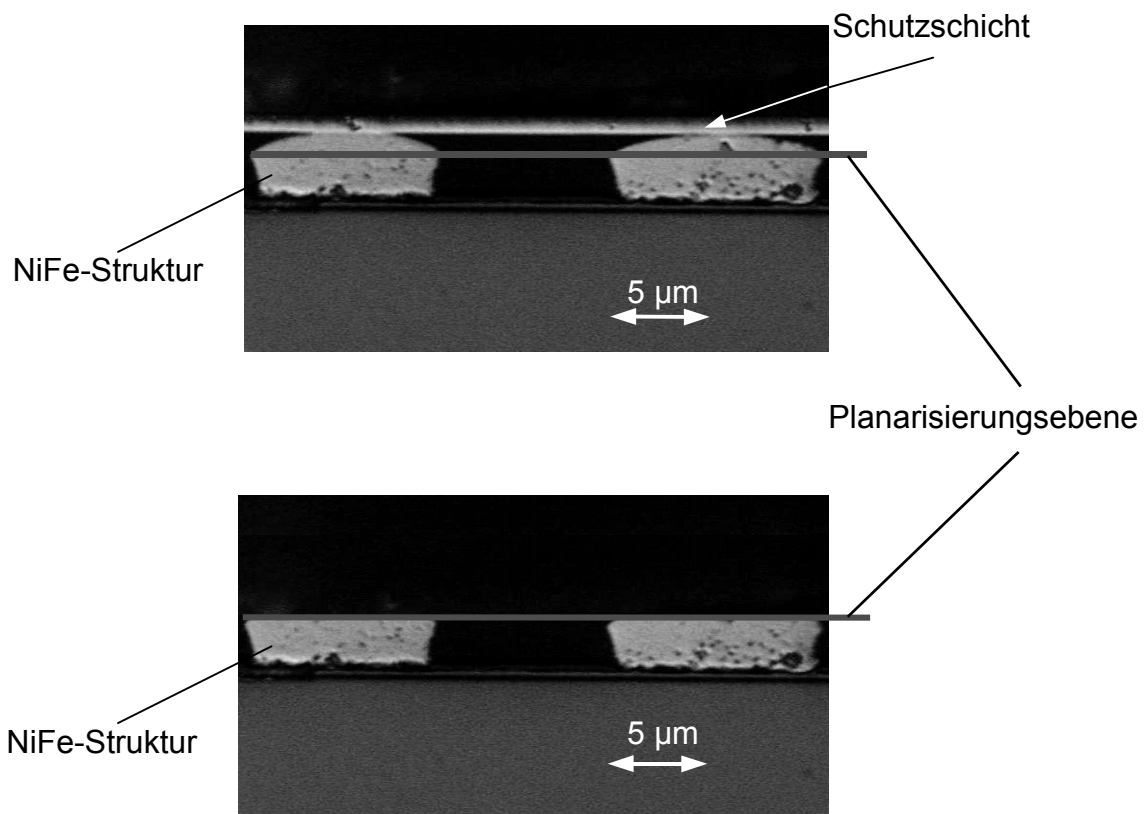
Um eine galvanische Abscheidung auf dem Wafer durchführen zu können, ist eine Startschicht auf der Waferoberfläche notwendig. Diese Schicht wird durch Kathodenzerstäubung (Sputtern) erstellt. Als Targetwerkstoff wurde dasselbe Material wie bei den folgenden galvanischen Strukturen verwendet: Permalloy (NiFe 81/19). Die Schichtdicke der Startschicht betrug 200 nm. Zur Verbesserung der Haftung der gesputterten Schichten und den darauf abgeschiedenen galvanischen Schichten wird zuvor eine Chromschicht von rund 30 nm Dicke als Haftvermittler durch Kathodenzerstäubung aufgebracht. Die Abscheideraten der gesputterten Schichten betragen ca. 3,7 nm/s bei Chrom und 0,4 nm/s bei Nickel-Eisen.

Nach dem Aufbringen der Startschicht wird das Substrat mit einer dicken Photoresistschicht (ca. 65 μm) beschichtet. Die optimale Schichtdicke des Photoresists wurde vorher in Testreihen ermittelt. Dünnere Schichten sind nicht geeignet aufgrund der tiefen Gruben auf der Waferoberfläche. Bei dünneren Schichten zieht sich der Photoresist am Grubenrand zusammen und bildet

ungeschützte Bereiche. Der Grund dieser Erscheinung liegt in den Oberflächenspannungen des Photoresists.

Bei der weiteren photolithographischen Prozessierung entsteht die Photomaske für die darauffolgende galvanische Abscheidung. Die Abscheiderate einer mittleren Stromdichte von 70 mA/mm^2 beträgt ca. $2,3 \text{ nm/s}$, die Höhe des unteren Kernteils $15 \text{ }\mu\text{m}$. Da galvanisch erzeugte Strukturen keine ebene Oberfläche besitzen, wird als Strukturhöhe die minimale Höhe angenommen. Später werden die Strukturen mechanisch bearbeitet, um eine ebene Oberfläche zu erhalten.

Nach dem galvanischen Prozess wird die Photoresistschicht durch Abspülen mit Aceton entfernt und die Startschicht durch Trockenätzen (IBE) abgetragen. Für Nickel-Eisen ist eine Ätzrate von etwa $42,5 \text{ nm/min}$ zu veranschlagen.



2005 imt 5017-059

Bild 7.4: Planarisierung von in SU-8 eingebetteten Strukturen

Nachdem die Strukturierung durchgeführt und die Startschicht entfernt ist, wird das Substrat mit einer Schicht aus dem Epoxydharz SU-8 versehen. Dieser Resist wird nach der Belichtung und der nachfolgenden thermischen Behandlung in den gängigen Lösungsmitteln unlöslich und lässt sich gut mechanisch bearbeiten. Im Maskierungsschritt mit SU-8 werden nur die Gruben mit dem unteren Kernteil abgedeckt, während das restliche Substrat mit den anderen Strukturen frei bleibt. Dies ist wichtig für das spätere Trennschleifen der fertigen Sensoren, da auf diese Weise nur durch das Silizium geschnitten wird und keine Sensorschichten beschädigt werden können.

Nach der Einbettung in SU-8 wird das Substrat mit den fertigen Nickel-Eisen- und SU-8-Strukturen auf die Oberfläche der Nickel-Eisen-Strukturen herunterpoliert, weil galvanische Strukturen keine optimale Oberfläche für den Aufbau weiterer Strukturen besitzen (Bild 7.4) und deswegen vor dem Aufbau der Pole und der Spulen eine ebene Oberfläche besitzen müssen.

Die hohen Anforderungen an die Ebenheit sind mittels CMP (Chemical-Mechanical-Polishing) erzielbar. Der Materialabtrag mittels CMP ist eine Kombination aus einem chemischen und einem mechanischen Mechanismus, welche sich gegenseitig ergänzen. Den mechanischen Abtragsmechanismus bewirken in der Poliersuspension verteilte Abrasivkörner [KOU02]. Eine in der Suspension erhaltene Säure greift die Oberfläche an und beschleunigen dadurch der Abtragsprozess.

Im Schritt Einbettung und Planarisierung wird der Kernteil eingebettet und elektrisch von den umliegenden Strukturen isoliert. Die Strukturoberfläche wird dabei auch planarisiert und eingeebnet, was einen verbesserten Aufbau der Pole und Spulen auf der Oberfläche der Kernstrukturen ermöglicht.

Als nächster Schritt ist die Isolation der Oberfläche der Nickel-Eisen-Strukturen vorgesehen. Die Kernoberfläche muss von der ersten Spulenlage elektrisch getrennt werden und es müssen gleichzeitig Öffnungen für Pole entstehen. Dazu wird als dielektrisches Material eine dünne Schicht aus SU-8 aufgeschleudert, die dann photolithographisch strukturiert und thermobehandelt wird, so dass die erforderliche Isolationsschicht entsteht. Die Dicke dieser Isolationsschicht beträgt 2 μm (Bild 7.5).

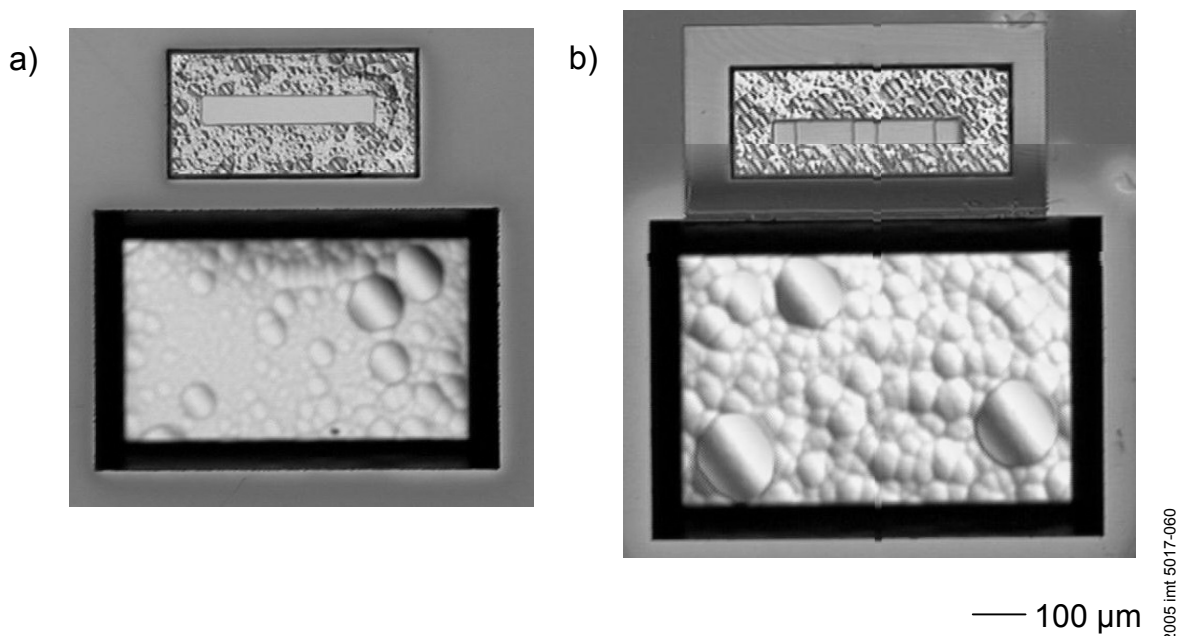


Bild 7.5: Herstellung des unteren Kernteils (a) und Isolierungsschicht (b), Variante 4

7.2.3 Herstellung der Spulen

Der Wirbelstromsensor besitzt zwei Spulenlagen. Die untere Spulenlage dient als Erregerspule, die obere als Sensorspule. Die Prozessfolgen für beide Spulen sind

sehr ähnlich und unterscheiden sich nur in der Verwendung von unterschiedlichen Masken und Photoresisten. Beide Spulen werden aus Kupfer hergestellt. Die Spulenstruktur wird galvanisch abgeschieden, die Höhe der Strukturen beträgt $5\text{ }\mu\text{m}$. Da beide Spulenlagen unterschiedliche Abmessungen haben, werden zwei Photoresists mit unterschiedlichem Auflösungsvermögen angewendet. Für die Herstellung der ersten Spulenlage mit einer einzigen Windung und einem Querschnitt von $70\text{ }\mu\text{m} \times 5\text{ }\mu\text{m}$ wird der hochviskose Resist AZ 9260 verwendet, für die zweite Spulenlage mit 8 Windungen und dem kleineren Querschnitt $10\text{ }\mu\text{m} \times 5\text{ }\mu\text{m}$ bei einem Abstand von $7\text{ }\mu\text{m}$ zwischen den Windungen wird der Resist AZ 5214 eingesetzt, da er eine höhere Strukturauflösung ermöglicht.

Der Elektrolyt für die Kupferabscheidung basiert auf CuSO_4 , mit Zusätzen von H_2SO_4 , HCl und organischen Badergänzungen [AHN93a]. Die Abscheiderate der Kupfergalvanik beträgt ca. 8 nm/s bei einer Stromdichte von $0,2\text{ mA/mm}^2$. Zur Entfernung der Startschicht kommt ein Trockenätzprozess zum Einsatz.

Nach dem galvanischen Prozess werden die Strukturen in SU-8 eingebettet. Dabei werden durch photolithographische Strukturierung die Vias (Durchkontaktierungen), Pole, Kontaktpads und die Zwischenräume zwischen den einzelnen Sensorelementen freigelassen. Die Pole werden parallel zu den Spulen hergestellt und ebenfalls in SU-8 eingebettet. Bild 7.6 zeigt eine schematische Darstellung der Abfolge zur Herstellung beider Spulenlagen und der Pole.

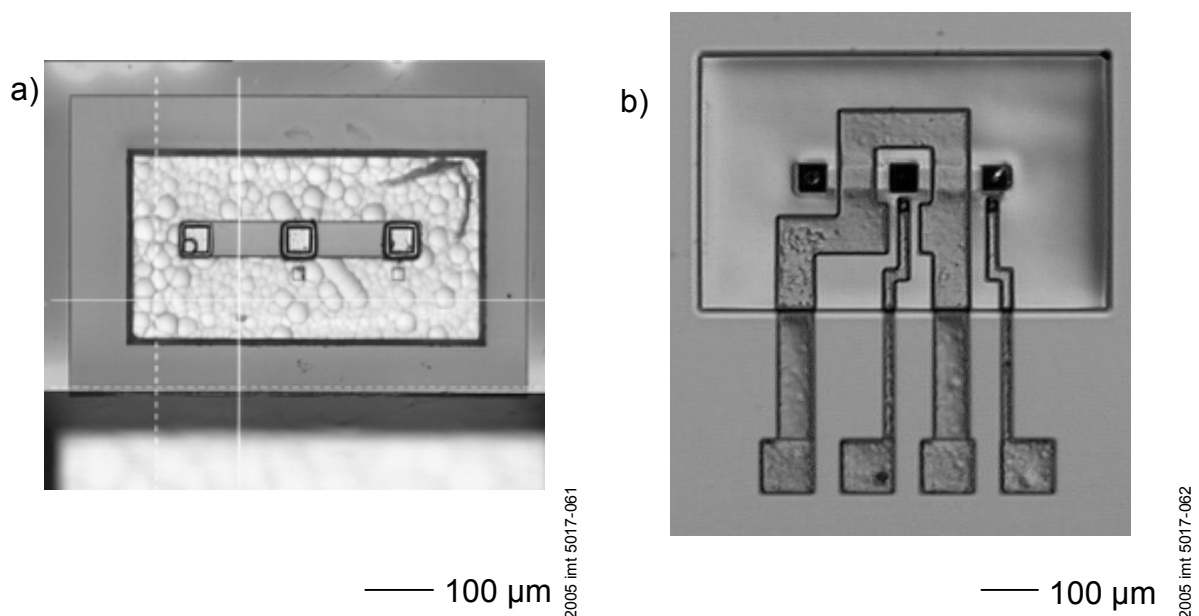


Bild 7.6: Herstellung der Pole, Variante 4 (a) und der Erregerspule, Variante 2 (b)

7.2.4 Herstellung von Isolationsschichten

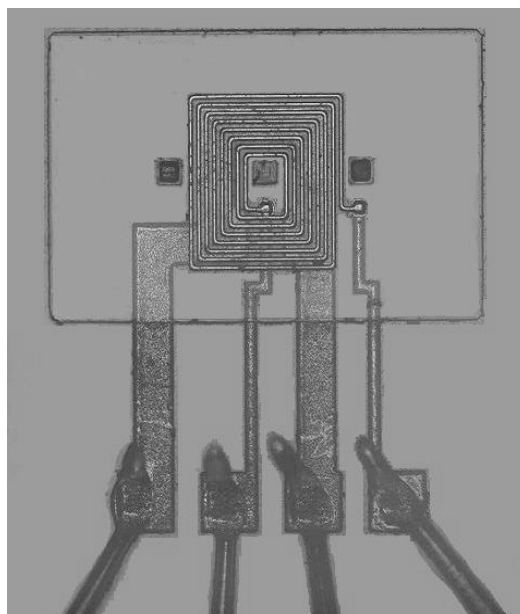
Wie bereits in Kapitel 6 erwähnt, kommen sowohl anorganische als auch organische Isolationsmaterialien zum Einsatz. Als anorganische Isolationsschicht wird bei der Wirbelstromsensorherstellung Aluminiumoxid (Al_2O_3) verwendet. Es besitzt gute dielektrische Eigenschaften und wird durch Kathodenzerstäuben

aufgebracht. Aluminiumoxid hat im Vergleich zu Nickel-Eisen oder Kupfer sehr niedrige Abtragsraten beim Ionstrahlätzen und kann nicht selektiv strukturiert werden. Der nasschemische Ätzprozess ist auch auszuschließen, da Aluminiumoxid hier eine hohe chemische Resistenz aufweist und nur sehr langsam abgetragen werden kann. Um Aluminiumoxid zu strukturieren, wird deshalb ein Lift-off-Prozess eingesetzt, mit dessen Hilfe rasch Strukturen aus Aluminiumoxid hergestellt werden können.

Als organisches Isolationsmaterial werden photoempfindliche Epoxiharze SU-8-2005 und SU-8-25 verwendet. Die Schichtdicke beträgt je nach Strukturhöhe zwischen 7 und 25 μm . Die Strukturierung erfolgt mittels Belichtung durch eine photolithographische Maske hindurch, Thermobehandlungsschritte, einer Flutbelichtung (mit Glasmasken), einem Entwicklungsschritt und einer anschließenden Thermobehandlung (Hard Bake) bei 100°C. Anschließend kann der SU-8-Resist mit CMP bearbeitet werden. Bei der mechanischen Bearbeitung werden durch Abtrag der ausgehärteten Photolackstrukturen die darin eingebetteten Metallstrukturen freigelegt.

7.3 Vereinzlung und Kontaktierung

Bei der Fertigung des Mikrosensors entstehen mehr als 4000 Sensoren pro Wafer. Um die einzelnen Sensoren voneinander zu separieren, wird der Wafer mittels Trennschleifen vereinzelt. Um dies ohne Bauteilverluste zu ermöglichen, sind die Einzelelemente so platziert, dass ein ausreichender Abstand zwischen den Sensorelementen entsteht. Dieser Abstand wurde durch Addieren von Schnittbreite, Kantenausbrüchen und Fehlern berechnet.



— 100 μm

2005 imt 5017-063

Bild 7.7: Kontaktierte Strukturen (Prototyp ohne Gruben), Variante 2

Nach der Vereinzelung werden die Einzelemente auf ihre Funktionsfähigkeit überprüft und dazu auf einer Leiterplatte positioniert. Bei dieser Untersuchung werden Einzelemente mit einem Nadelprobegerät vermessen und fehlerhafte Bauteile aussortiert. Bei diesen Messreihen werden Isolierungen, Leitungen und Durchkontaktierungen überprüft.

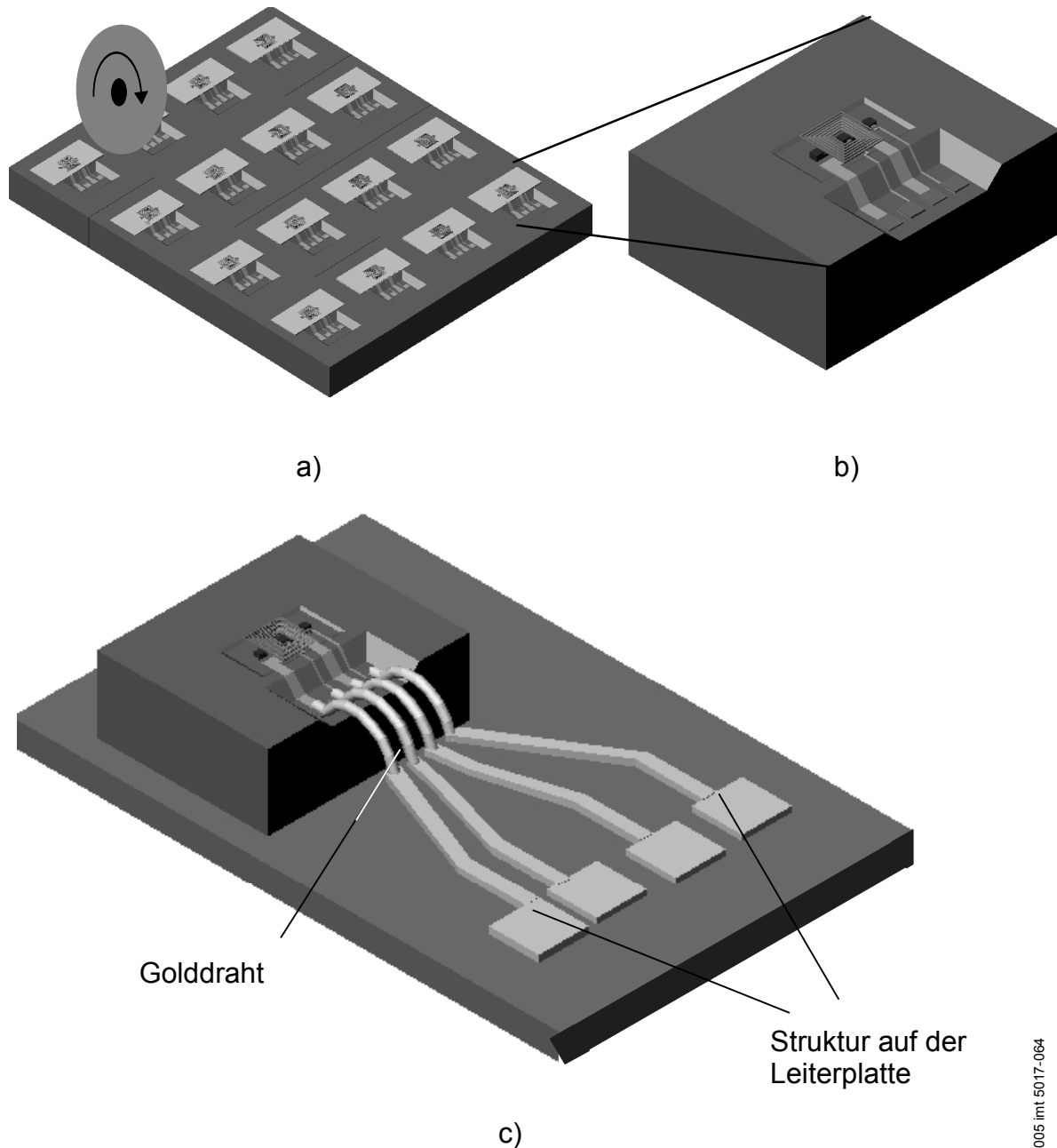


Bild 7.8: Vereinzeln (a), Einzelbauteil (b), auf die Leiterplatte geklebtes und gebondetes Bauteil (c)

Nach dem Aufkleben des Sensors auf der Leiterplatte werden die Sensorelemente vorkontaktiert. Das heisst, das Bauteil wird zuerst mit der Leiterplatte verbunden, die größere Kontaktpads erhält, und kann dann gelötet werden. Die Vorkontaktierung wird mittels Ultraschallbonden durchgeführt. Bei diesem Prozess werden Ultraschallwellen durch die Kontaktnadel geleitet, wodurch

sich ein dünner Golddraht mit dem Durchmesser von $38\text{ }\mu\text{m}$ mit den Sensorkontaktpads verbindet. Nachfolgend wird der Golddraht mit dem gleichen Prozess an die Leiter auf die Platte gebondet. Bild 7.7 zeigt einen Prototyp des Wirbelstromsensors mit auf Kontaktpads gebondeten Golddrähten.

Nach dem Bonden können die $38\text{ }\mu\text{m}$ Drähte direkt auf die Leiterplatte gelötet und an das Messgerät angeschlossen werden. Bild 7.8 zeigt schematisch den Vereinzelungsprozess, das Aufkleben auf die Leiterplatte und die Kontaktierung.

8 Experimentelle Untersuchungen am Sensor

8.1 Experimentelle Voruntersuchungen

8.1.1 Charakterisierung der Nickel-Eisen-Schichten

Bei der Sensorherstellung haben die magnetischen Eigenschaften der NiFe-Schichten einen großen Einfluss auf die Messeigenschaften des gesamten Sensors. Die Verwendung eines magnetischen Kerns ergibt eine höhere magnetische Feldstärke um den Kern. Er hilft auch bei der Fokussierung von Feldern in das Messobjekt und verbessert damit die magnetische Kopplung zwischen Sensor und Objekt.

Relevante Kennwerte für das Kernmaterial sind ein möglichst hoher Permeabilitätswert und Sättigungsmagnetisierung, um den magnetischen Kern bei hoher Durchflutung nicht in den magnetischen Sättigungsbereich zu bringen. Um Hystereseverluste zu vermindern, sollte das Material eine möglichst niedrige Koerzitivfeldstärke zeigen. Zu berücksichtigen ist ein hoher spezifischer Widerstand zur Unterdrückung der Wirbelstromverluste im Kern.

Das ausgewählte NiFe 81/19 zeichnet sich durch seine hohe Permeabilität und ein geringes Koerzitivfeld sowie einen relativ hohen spezifischen Widerstand aus und wird deshalb als Material für den Kern bevorzugt verwendet. Die Änderung der magnetischen Eigenschaften bei Betrieb mit hohen Frequenzen ist zu berücksichtigen.

Da NiFe-Schichten beim Aufbau des Wirbelstromsensors durch einen galvanischen Prozess entstehen, müssen alle Parameter genau angepasst werden, um die gewünschte stöchiometrische Zusammensetzung von Nickel und Eisen zu erzielen.

Um die Zusammensetzung galvanischer Schichten zu untersuchen, werden Versuchsreihen durchgeführt. Bei diesen wurden unterschiedliche Parameter beim galvanischen Prozess (wie Stromdichte, Vorwärts- und Rückwärtsleistung) variiert, um den Zusammenhang zwischen Prozessparametern und Zusammensetzung des Nickel-Eisens zu ermitteln und die optimalen Parameter festzulegen.

Zuerst wurden drei Varianten bezüglich des Verhältnisses von Vorwärts- zu Rückwärtsleistung untersucht: Bei der ersten wurde die Vorwärtsleistung deutlich höher als die Rückwärtsleistung gewählt. Bei der zweiten Versuchsreihe wurden Differenzen der Vorwärts- und Rückwärtsleistungen von nicht mehr als 20% eingestellt. Bei der dritten Reihe wurde der Wert der Vorwärtsleistung deutlich niedriger als die Rückwärtsleistung gewählt (Tabelle 8.1).

Tabelle 8.1: Variation der galvanischen Abscheideparameter

Vorwärtsstrom [mA]	Rückwärtsstrom [mA]	Mittlerer Strom [mA]	NiFe Zusammensetzung [%]
100	20	92	83 / 17
100	80	83	87 / 13
100	132	69	81 / 19
150	238	130	71 / 39
200	100	176	74 / 26
200	262	135	80 / 20
300	100	270	69 / 31
300	400	286	70 / 30
400	510	380	78 / 22
400	100	390	77 / 23

Aus dieser Tabelle kann man sehen, wie sich die NiFe-Zusammensetzung in Abhängigkeit von Vor- und Rückwärtsstrom und den daraus resultierenden mittleren Stromwerten ändert. Dabei wurde ermittelt, dass bei den ersten zwei Versuchsreihen die Oberflächenqualität der hergestellten Schichten schlechter war als bei der dritten Versuchsreihe. Das Schichtwachstum schwankt zwischen dem Rand und der Mitte der Wafer. Zudem entstanden innere Spannungen in den Schichten, was zum Abplatzen einzelner Strukturen führte. Die dritte Versuchsreihe lieferte Schichten höherer Qualität, weshalb genauere Untersuchungen der Nickel-Eisen-Zusammensetzungen und ihrer magnetischen Eigenschaften bei der Abscheidung mit etwas höherer Rückwärtsleistung durchgeführt wurden. Das optimale Verhältnis zwischen Vorwärts- und Rückwärtsleistung liegt bei etwa 7/10.

Nach Bestimmung der optimalen Nickel-Eisen-Zusammensetzung wurden die magnetischen Eigenschaften der hergestellten Schichten bestimmt. Von besonderer Bedeutung waren dabei Sättigungsflussdichte und Permeabilität.

8.1.2 Charakterisierung von Leiterwerkstoffen

Zur Charakterisierung der Leitereigenschaften wurden Untersuchungen an einzelnen Spulen durchgeführt. Um diese Untersuchungen realisieren zu können, wurden zwei Testwafer mit Erreger- und Messspulenstrukturen hergestellt.

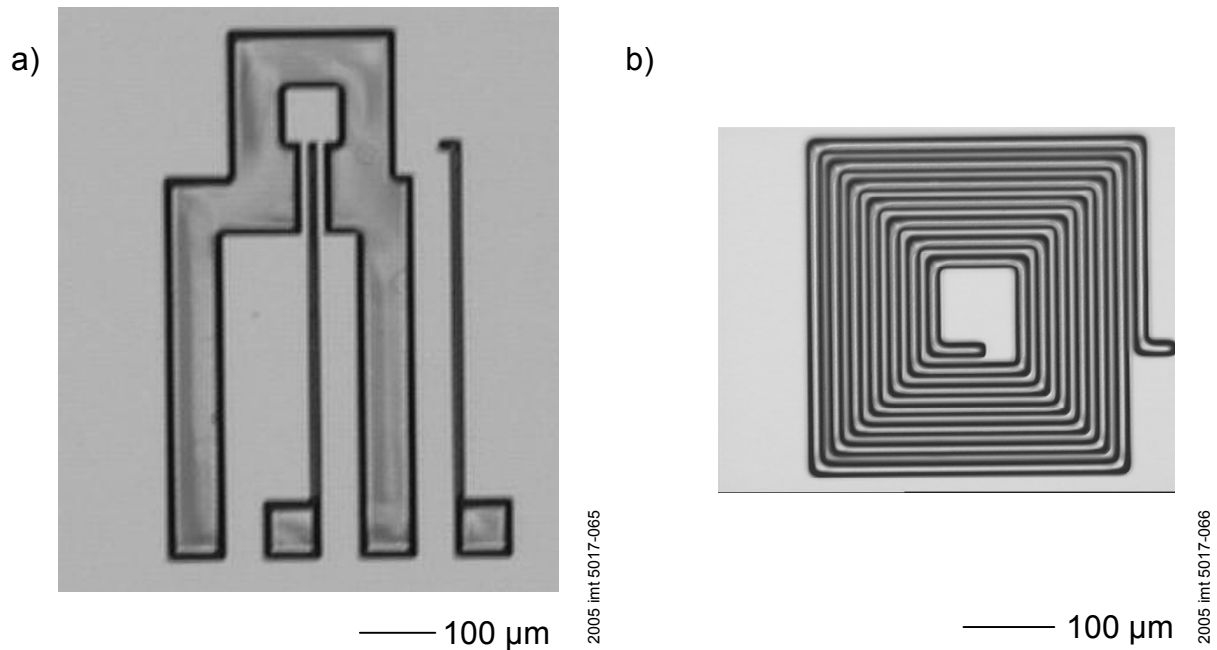


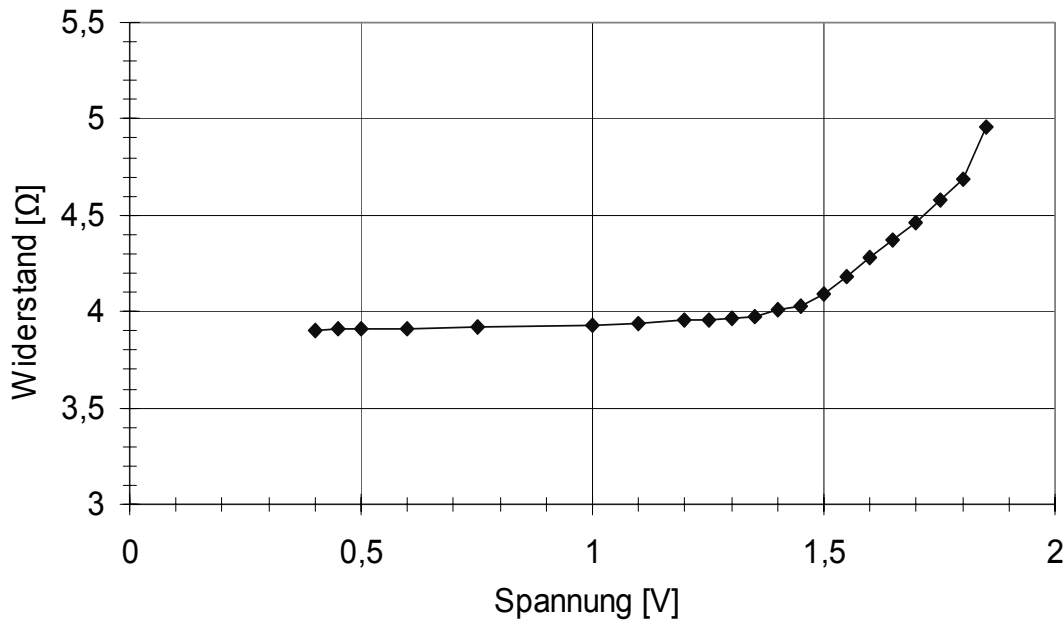
Bild 8.1: Strukturen der Erregerspule (a) und Messspule (b)

Die beiden Spulenlagen besitzen unterschiedliche Leiterbreite, -länge und Windungszahl (Bild 8.1). Die wichtigsten Werte sind in der Tabelle 8.2 aufgeführt.

Tabelle 8.2: Eigenschaften von Leiterstrukturen

Spulenlage	Leiterbreite [mm]	Leiterlänge [mm]	Dicke des Leiters [mm]	Spulenfläche [mm ²]	Spezifischer Widerstand ρ [$10^{-4} \Omega \text{cm}$]
1. Spulenlage	0,07	1,792	0,005	0,1255	0,017
2. Spulenlage	0,007	10,580	0,005	0,0529	

Hinzu wird die Spule zuerst mit dünnen ($\varnothing 38 \mu\text{m}$) Golddrähten an eine Leiterplatte kontaktiert, dann vermessen. Die Widerstandswerte für die einzelnen Windungen können, aufgrund ihrer begrenzten Kontaktfläche, nicht gemessen werden. Bei der geringen Leiterbreite ist eine korrekte Messung mit dem Nadelprober nicht gewährleistet. Eine Messung des Gesamtwiderstandes der Spule ist jedoch möglich. Um die Widerstände in den Kabeln zu erfassen, wird zunächst eine Widerstandsmessung der Kabel durchgeführt, die an der Messung nötig sind. Diese Werte werden von den für die Spulen gemessenen Werten subtrahiert. Als Gesamtwiderstand der ersten Spulenlage ergibt sich ein Wert von $0,56 \Omega$. Bei der zweiten Spulenlage beträgt der Gesamtwiderstand etwa $3,8 \Omega$.



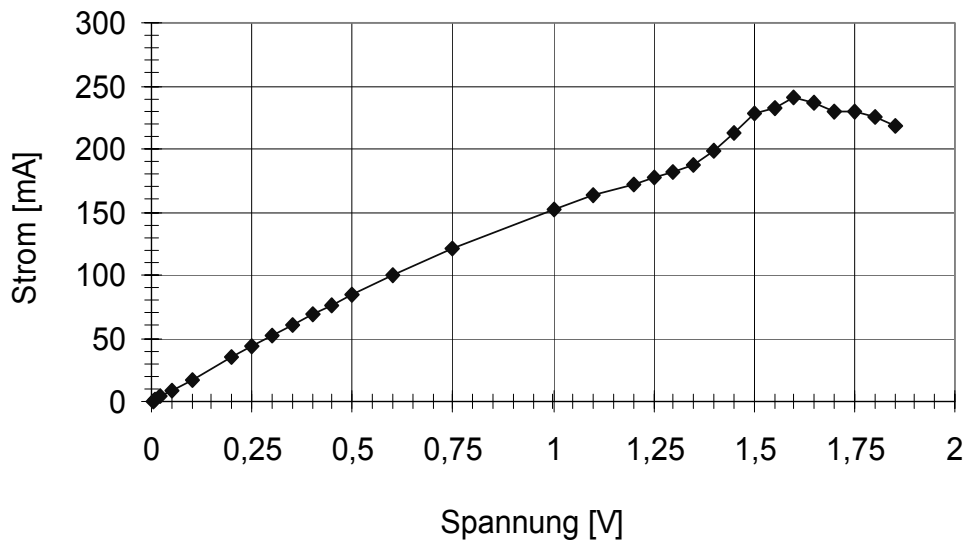
2005 imt 5017-067

Bild 8.2: Widerstandsmessung in der Messspule in Abhängigkeit von der Spannung

Die Widerstandsmessung an den Spulen wurde parallel zur Untersuchung der Strombelastbarkeit durchgeführt. Bei diesen Untersuchungen wurden die Spannungswerte erhöht und dann der Widerstand der Spule gemessen. In Bild 8.2 ist die Widerstandsmessung in der Messspule in Abhängigkeit von der Spannung dargestellt.

Zur Untersuchung der Strombelastbarkeit wurde die Strom-Spannungs-Kennlinie der Messspule aufgenommen. Bei der Erregerspule waren diese Messungen nicht möglich, da die Kontaktdrähte einen kleineren Querschnitt als die Erregerspule haben und die maximalen Stromwerte zu schnell erreicht werden. Beim Erreichen des Strommaximums brennen die Kontaktdrähte durch, und eine weitere Messung ist nicht möglich.

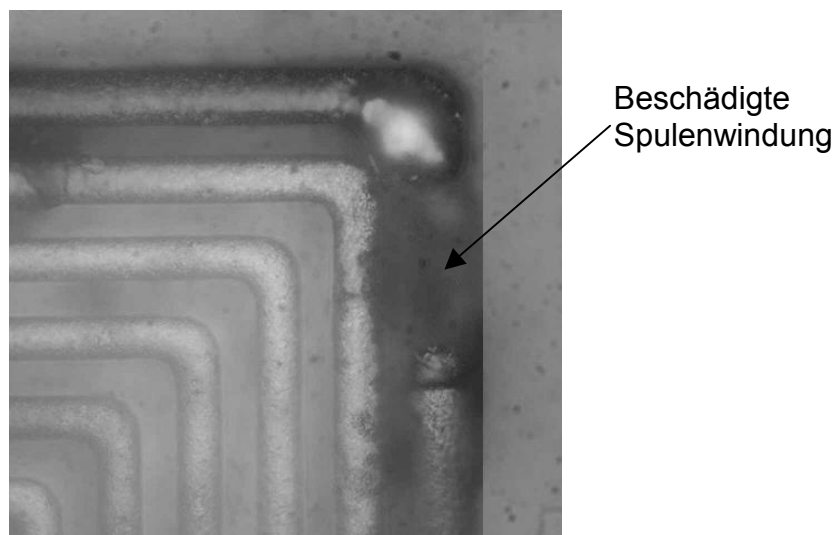
Bei der Untersuchung der Strombelastbarkeit der Messspule wird die kontaktierte Spule mit einer Spannungsquelle verbunden. Während die Gleichspannung der Quelle variiert wird, kann der von der Quelle durch die Spule fließende Strom gemessen werden. Bild 8.3 zeigt die empirisch ermittelte Strom-Spannungs-Kurve der Messspule.



2005 imt 5017-068

Bild 8.3: Strom-Spannungs-Kurve einer Messspule

Mit zunehmender Spannung steigt der Spulenstrom an, bis das Maximum für eine Spannung von 1,85 V erreicht wird. Der Widerstand erhöht sich von $3,8 \Omega$ auf $4,96 \Omega$. Bei Erreichen des Spannungswertes von 1,6 V verringert sich der Spulenstrom, der Spulenwiderstand steigt jedoch weiterhin an, ohne dass die Spannung an der Quelle verändert wird. Dieser Vorgang setzt sich fort, bis die Spulenwindung durchbrennt. Die mikroskopische Aufnahme einer durch überhöhte Spannung zerstörten Spulenstruktur ist in Bild 8.4 zu sehen.

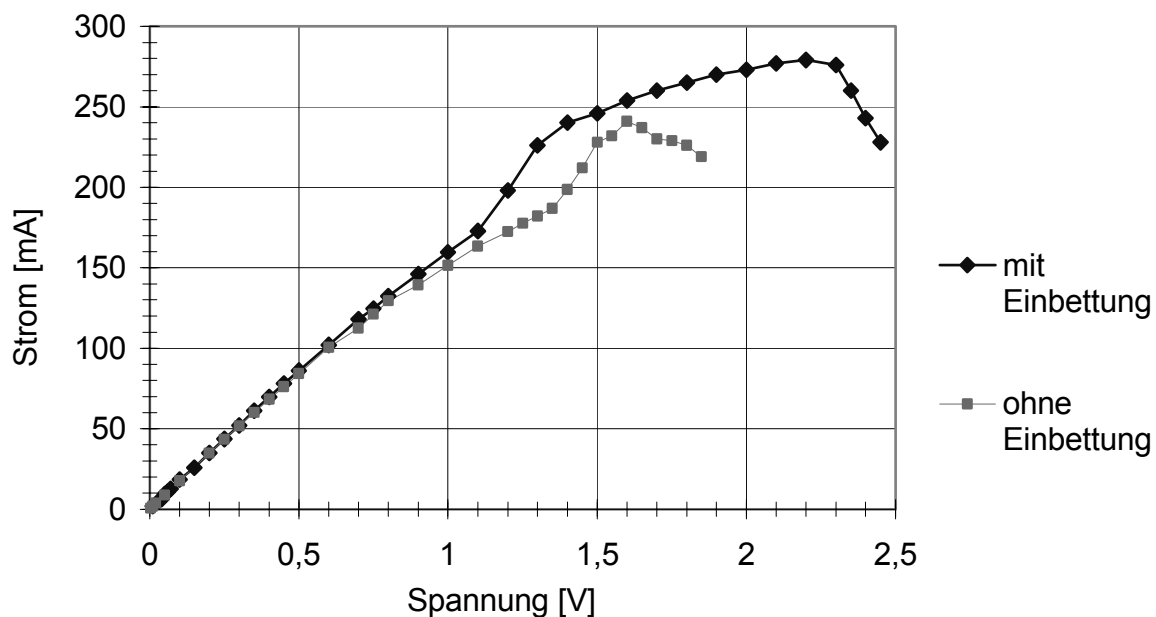


2005 imt 5017-069

Bild 8.4: Durch starken Stromfluss beschädigte Messspule

Es wurden zwei Messreihen durchgeführt. Die erste Reihe umfasste die Messung der Strombelastbarkeit der Spulen auf Siliziumoxid-Wafern, deren erste Spulenlage in Photoresist eingebettet wurde. Bei der zweiten Messreihe wurden beide Spulenlagen nacheinander in eine Photoresistschicht eingebettet, so dass sie von organischem Isolierungsmaterial umschlossen sind. Bei Strömen höher als

230 mA wurden Veränderungen in Form von Materialaufschmelzungen am organischen Isolierungsmaterial festgestellt. Ein maximaler Strom von 246 mA durch die in Photoresist eingebettete Messspule ist möglich. Bei der nicht eingebetteten Messspule beträgt der höchste Stromwert nur 235 mA. Aus diesen Messungen kann man schlussfolgern, dass die Einbettung in ein organisches Isolationsmaterial bis 150 mA und 1 V keinen sehr großen Einfluss auf die Strom-Spannungs-Belastbarkeit der Spule mit sich bringt (Bild 8.5). Bei der weiteren Erhöhung der Spannungs- und Stromwerte wird jedoch ein deutlicher Unterschied beobachtet. Aus diesen Untersuchungen kann man schließen, dass eine eingebettete Messspule höhere Stromwerte zulässt als eine uneingebettete, bevor sie durchbrennt.



2005 int 5017-070

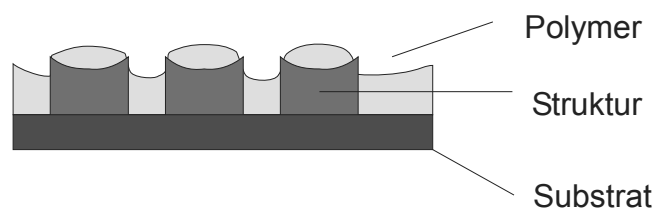
Bild 8.5: Strom-Spannungs-Kurve einer Messspule mit und ohne Einbettung in organisches Isolierungsmaterial

Die maximalen Stromwerte wurden für beide Spulenlagen bestimmt. Der maximale Strom bei der Erregerspule mit einer Querschnittsfläche von $350 \mu\text{m}^2$ liegt bei 2,53 A bei eingebetteter Spulenlage und mit Isolierungsschicht. Der maximale Strom bei der Messspule mit einer Querschnittsfläche von $35 \mu\text{m}^2$ beträgt 235 mA bei nicht eingebetteter Messspule und 285 mA bei der eingebetteten Spule.

8.1.3 Untersuchung der Planarisierbarkeit von Isolationsschichten

Da bei der Herstellung des Wirbelstromsensors alle Strukturen in eine Photoresistschicht eingebettet sein sollen, spielt die Planarisierbarkeit bei der Charakterisierung von Isolationsschichten eine große Rolle. Es zeigte sich auch, dass das Planarisierungsergebnis von der Belackung, dem Wärmebehandlungsprozess und von der Umgebung, Form und lateralen Verteilung der zu planarisierenden Struktur abhängt.

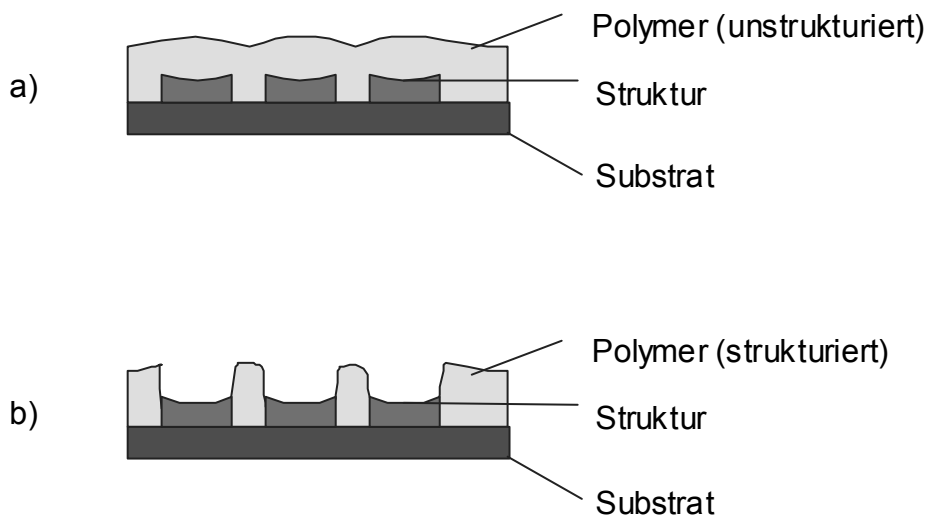
Zur Untersuchung der Planarisierbarkeit wurde zuerst eine Versuchsreihe auf einem Wafer ohne Gruben durchgeführt. Dazu wurden zuerst metallische Strukturen mit bestimmter Dicke auf der Waferoberfläche aufgebaut. Dann wurde durch das Aufschleudern eine dünne Photoresistschicht auf die Oberfläche aufgebracht. Beim ersten Versuch wurde die Schleudergeschwindigkeit so ausgewählt, dass die Photoresistschicht fast genau so dick ist wie die Strukturhöhe. Bei der nach der Belackung für gleichmäßige Verteilung des Photoresists folgenden Ruhepause wurde beobachtet, dass sich der Resist an Strukturgrenzen zusammenzieht und sich nicht eingebettete Bereiche rund um die Strukturen bilden (Bild 8.6). Bei diesen Strukturen kommt es zur Aufwölbung des Resists aufgrund von Oberflächenspannungen, was zur Unterbrechung der Isolationsschicht führt.



2005 imt 5017-071

Bild 8.6: Zusammenziehen einer Photoresistschicht

Um diesen Effekt zu vermeiden, wurde beim nächsten Versuch eine größere Menge von Photoresist bei niedrigerer Geschwindigkeit aufgeschleudert, so dass die Photoresistschicht doppelt so hoch wie die Struktur war. Bild 8.7.a zeigt die Verteilung einer unstrukturierten Photoresistschicht auf einem Wafer mit metallischen Strukturen.



2005 imt 5017-072

Bild 8.7: Profilschnitt eines Wafers mit Strukturen eingebettet in eine Photoresistschicht a) unstrukturiert, b) strukturiert

Um eine gute Oberfläche zu erreichen, sollten in dem Photoresist eingebettete Strukturen planarisiert werden. Die Herausforderung bei der Planarisierung besteht

darin, die herausgewachsenen Köpfe der Strukturen auf das Niveau des Einbettungsmaterials zu bringen und auch für eine globale Planarisierung des Photoresists selbst zu sorgen.

Der Planarisierungsprozess wird auf Poliermaschinen durchgeführt bei denen die Wafer auf rotierende Waferhalter gespannt sind und durch eine ihrerseits rotierende Polierscheibe bearbeitet werden. Die Kinematik entspricht dem Einseiten-Planlappen, wobei der Wafer gegen ein auf der Polierscheibe aufgeklebtes Poliertuch gedrückt wird. Die Rotationsbewegungen von Arbeitsscheibe und Wafer führen zur einer gleichmäßigen Verteilung der auf das Poliertuch aufgetragenen Poliersuspension. Da Wafer aufgrund innerer Spannungen zwischen Substrat und Schichten eine gewisse Welligkeit aufweisen, muss das Poliertuch die Fähigkeit besitzen, sich dieser Welligkeit anzupassen, um großflächig homogenen Materialabtrag gewährleisten zu können.

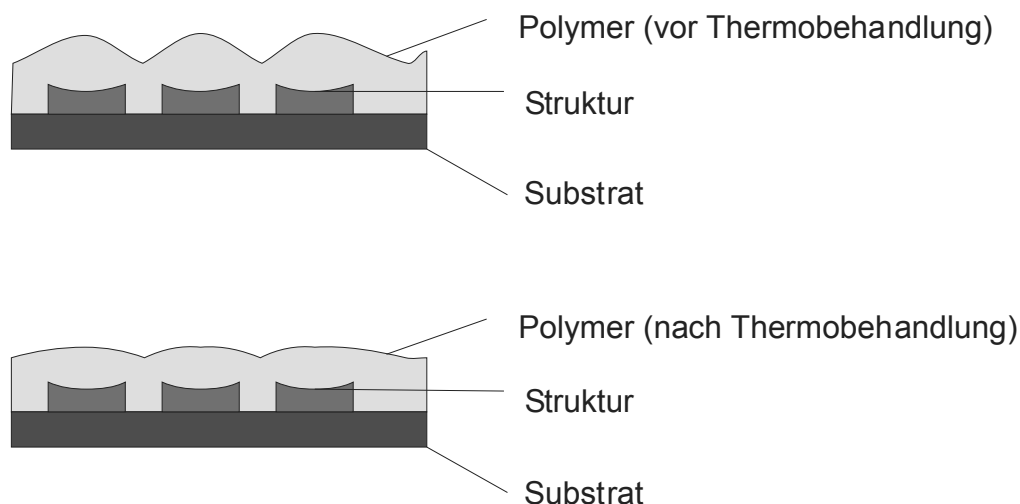
Die Ergebnisse der Planarisierung sind von der Oberflächenwelligkeit abhängig. In Tabelle 8.3 sind die Belackungsergebnisse dargestellt. Die Lackdicken über den Strukturen wurden bei der strukturierten Photoresistschicht gemessen, so dass die Struktur nur teilweise in Photoresist eingebettet war (Bild 8.7.b). Die Versuche ergaben, dass eine Verringerung der Photolackdicke nicht nur zum Zusammenziehen der Schicht, sondern auch zu einer Verschlechterung des Planarisierungsergebnisses führt. Das liegt darin begründet, dass die Photoresistschichtdicke in Zwischenräumen niedriger als die Strukturhöhe ist und bei der Planarisierung parallel auch die metallische Schicht zusammen mit dem Photoresist abgetragen werden soll.

Tabelle 8.3: Planarisierung von Photoresistschichten mit eingebetteten Strukturen

Nr.	Struktur	Strukturbreite/ -höhe [μm]	Resistdicke (berechnet) [μm]	Resistdicke, über/ zwischen Strukturen [μm]	Welligkeit [μm]
1	Kern	50 / 15	15	13 / 7	6
2	Kern	50 / 15	25	22 / 17,5	4,5
3	Kern	50 / 15	30	25 / 27	2
4	Spule	7 / 5	10	9 / 6,5	2,5
5	Spule	7 / 5	15	12 / 10,5	1,5

Das beste Planarisierungsergebnis beim Freilegen des Kerns wurde bei Schichtdicken von ca. 30 μm erzeugt. Das Ergebnis ist durch die kleinere Welligkeit und bessere Verteilung des Photoresists zwischen den Strukturen zu erklären.

Auch die Strukturabmaße und der Abstand zwischen den Strukturen spielen eine große Rolle bei der Verteilung von Photoresist. Bei höheren Kernstrukturen wird die Welligkeit größer als bei niedrigen Spulenstrukturen. Der Einfluss des Abstands zwischen den Strukturen kann am Beispiel der Spulen demonstriert werden. Bei diesen Strukturen beträgt der Abstand zwischen den Windungen nur 5 μm und der Abstand zwischen Spulenstrukturen fast 1 mm. Es wurde beobachtet, dass Spulenstruktur die Welligkeit zwischen den einzelnen Spulenstrukturen und zwischen den Windungen innerhalb einer Spulenstruktur unterschiedlich ist. Dieser Effekt ist direkt nach der Belackung von Strukturen viel deutlicher, als nach der folgenden Thermobehandlung. Dies liegt daran, dass während der Thermobehandlung eine Einebnung des Photoharzes erfolgt und die Windungszwischenräume mit dem photoempfindlichen Polymer SU-8 gefüllt sind (Bild 8.8).



2005 lmt 5017-073

Bild 8.8: Einebnung des Photoresists durch thermische Behandlung

Die thermische Behandlung des Photoresists ist eine wichtige Einflussgröße für das Planarisierungsergebnis. Vom Hersteller des Photoresists SU-8 ist dokumentiert, dass die besten Ergebnisse bei der SU-8-Anwendung mit mehreren Thermobehandlungsschritten zu erzielen sind. Dazu gehören:

- Softbake (nach der Belackung)
- Post Exposure Bake (nach der Belichtung)
- Hardbake (nach der Entwicklung).

Für eine bessere Haftung des Photoresists auf der Substratoberfläche wurde ein Dehydrationsschritt vor der Belackung durchgeführt. Bei diesem Schritt wird die restliche Feuchtigkeit von der Waferoberfläche entfernt und somit eine bessere Haftung der SU-8-Strukturen erreicht.

Auch der Einfluss eines Hardbake auf das Planarisierungsverhalten wurde untersucht. Dazu wurden zwei Wafer mit identischen SU-8-Strukturen unter gleichen Bedingungen belackt, belichtet und strukturiert. Die zusätzliche Behandlung erfolgt nach der Entwicklung des SU-8. Die Thermobehandlung (Hardbake) wurde bei 120°C durchgeführt. Die beiden Wafer wurden nacheinander planarisiert und die Abtragsraten gemessen. Die Messungen zeigen, dass die Abtragsraten beim Wafer ohne Hardbake ca. 0,5 $\mu\text{m}/\text{min}$ und beim auf 120°C aufgeheizten Wafer nur ca. 0,09 $\mu\text{m}/\text{min}$ betragen. Zusätzlich wurde beim zweiten Wafer eine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber mechanischen Belastungen festgestellt. Auch zeigten die Welligkeitswerte beim mit dem Hardbake prozessierten Wafer fast das gleiche Ergebnis wie der ohne Hardbake behandelte Wafer. Aus diesen Gründen wurde bei der Bearbeitung von Wafern während des Herstellungsprozesses auf den Hardbake-Schritt verzichtet.

8.2 Aufbau des Messstandes

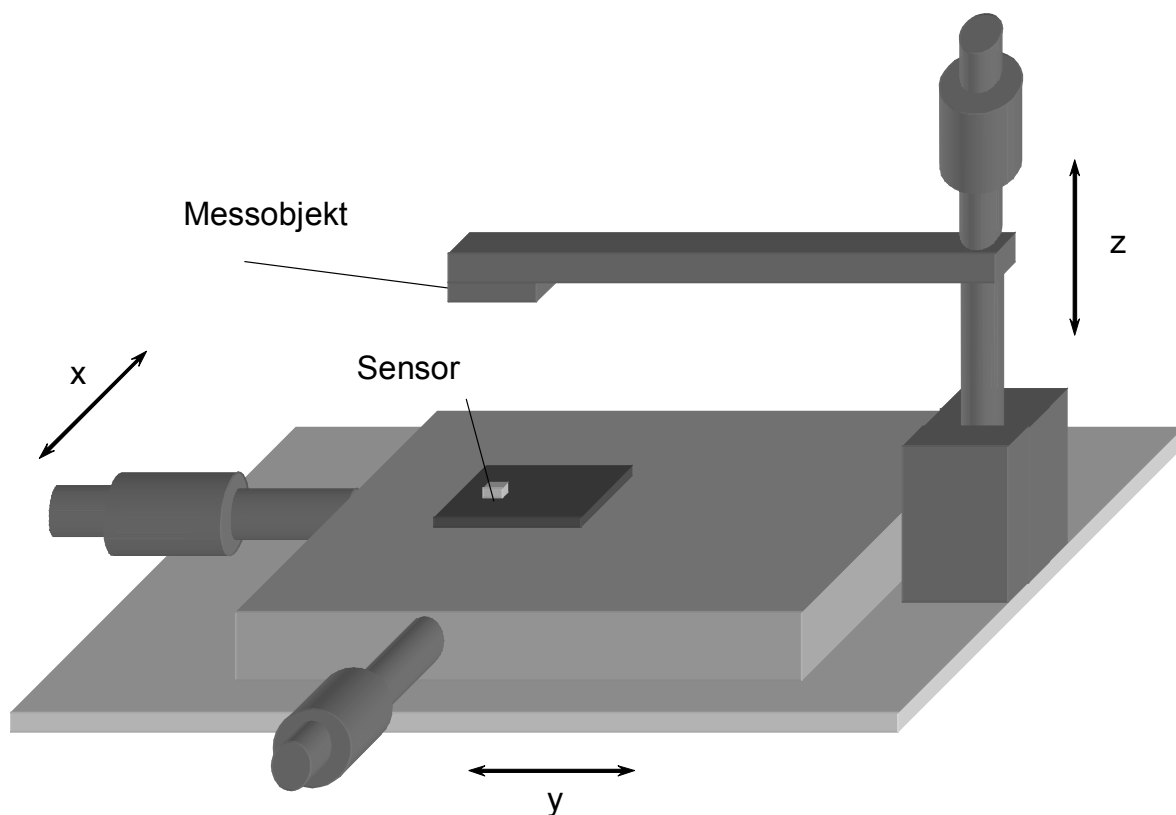


Bild 8.9: Messstand

Für die Durchführung von Messungen wurde zuerst ein Messstand aufgebaut. Beim Messstand handelt es sich um einen Positioniertisch, der in zwei Richtungen (x- und y-Richtung) beweglich ist (Bild 8.9). Jede Richtung ist mit einer Millimeterschraube ausgestattet, so dass die Tischposition genau einstellbar ist. Auf dem Tisch wird zuerst ein Mittelpunkt definiert, dort enthält der Aufbau eine Halterung für die Leiterplatte mit dem Sensor. In der Mitte der Halterung wird eine Vertiefung mit den gleichen Abmessungen wie die Leiterplatte für das Herausnehmen der Platte herausgeschnitten. Diese Halterung ist fest mit dem Tisch verbunden, dient für den einfachen Wechsel der Leiterplatten und verhindert ein Verrutschen und Verkippen der Platte auf dem Tisch.

Für die Bewegungen in z-Richtung wird ein Arm aufgestellt. Da die Bewegungen in z-Richtung sehr präzise und die Abstände sehr klein sein sollen, wird dieser Arm mit einer Mikrometerschraube versehen. Am Ende dieses Arms wird ein Messobjekt, die Stahlprobe, aufgeklebt. Die Probe wird vor dem Einsatz poliert und die Dicke vermessen, weil die Probenoberfläche möglichst eben sein und bei den Bewegungen des Sensors in x- oder y-Richtung der Abstand zwischen Sensor und Messobjekt konstant bleiben soll.

Vor der Messung werden zuerst die Höhen des Messstandes mit der eingebauten Sensorhöhe addiert, um einen Punkt bei der Messung zu finden, bei der der Abstand zwischen Sensor und Messobjekt null ist. Als Nullpunkt auf dem Messtisch wird ein Punkt angenommen, an dem das Messobjekt auf der Leiterplattenhalterung liegt. Dann wird grob die Höhe der obersten Strukturen des Sensors, der Pole, ausgerechnet. Hinzu kommen die Dicke der Klebefolie zwischen dem Sensor und der Leiterplatte, die Dicke des Siliziumträgers und die Strukturhöhe. Diese Höhe wird mit einem „Dummy-Sensor“ eingestellt und bestimmt den Nullpunkt bei der Messung.

Für die Durchführung der Messungen wird eine Spannungs-Strom-Quelle mit regelbarer Frequenz, ein Oszillograph, für die Messung der induzierten Spannungen in der Messspule benötigt.

8.3 Messungen am Wirbelstromsensor

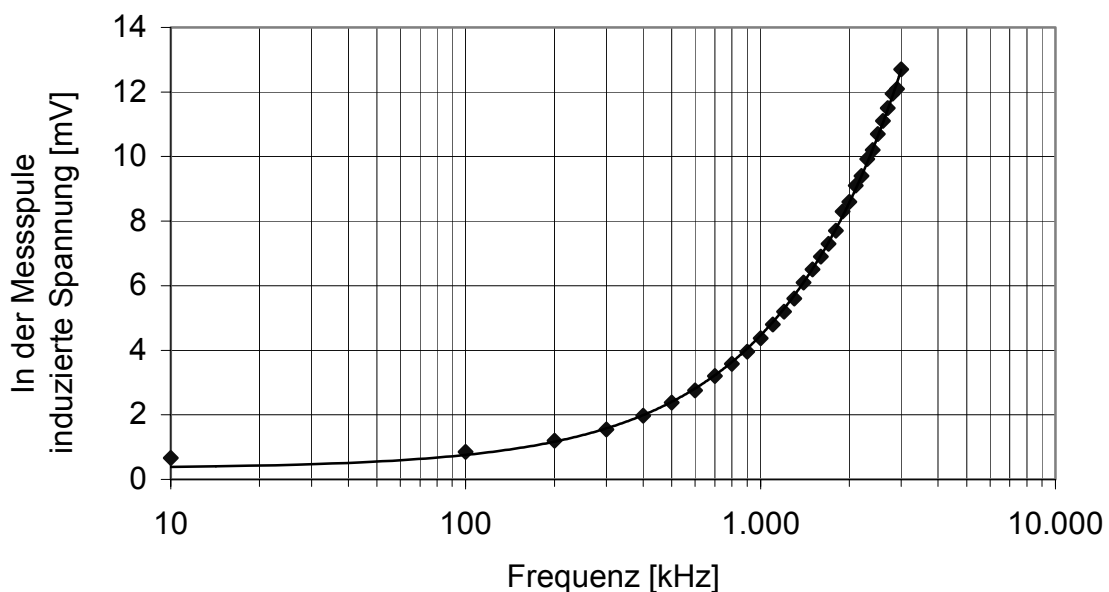
8.3.1 Messung der in der Messspule induzierten Spannung

Zur Durchführung von Messungen (bei der Verwendung einer Stahlprobe als Messobjekt) wurde die induzierte Spannung in der Messspule in Abhängigkeit von der Frequenz gemessen. Der Messfrequenzbereich reichte von 100 kHz bis 10 MHz. Simulationen legten den Bereich zwischen 100 kHz und 100 MHz als sinnvoll fest [ISW05]. Die bei der Messung verwendete Frequenzquelle kann eine maximale Frequenz von 50 MHz erzeugen.

Um Rauschsignale und parasitäre Kapazitäten bei der Messung zu vermindern, wurden die Kontaktdrähte von Erreger- und Messspule um den magnetischen Ring gewickelt. Um Auswirkungen des Abstands auf die induzierte Spannung in der

Messspule zu vermeiden, wurde die Lage des Sensors vom Messobjekt konstant gehalten. Als Material für das Messobjekt wird nichtrostender Stahl gewählt (Eigenschaften siehe Tabelle 8.4).

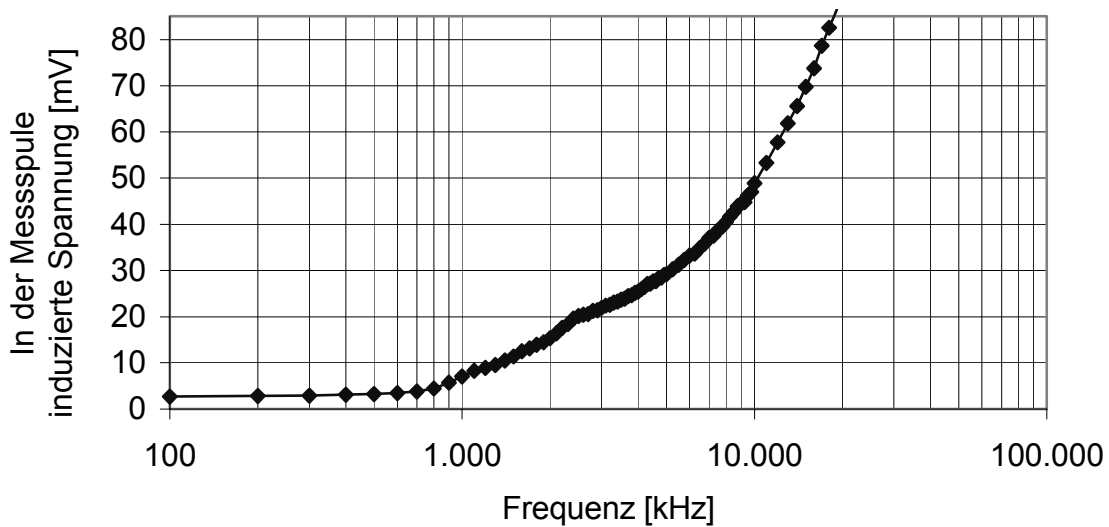
Es werden zwei Messreihen durchgeführt. Bei der ersten Messreihe werden Sensoren ohne magnetischen Kern vermessen. Bei diesen Versuchen wird jeweils die in der Messspule induzierte Spannung abgelesen (Bild 8.10). Dabei wird das Messobjekt über dem Sensor positioniert und ein konstanter Abstand zwischen Sensor und Messobjekt eingestellt. Der Abstand zwischen Sensor und Messobjekt beträgt $100\text{ }\mu\text{m}$ (da bei diesem Abstand die Messwerte am deutlichsten ablesbar sind). Der Frequenzbereich reicht von 100 kHz bis 3 MHz .



2005 int 5017-075

Bild 8.10: Induzierte Spannung in der Messspule in Abhängigkeit von der Frequenz bei den Sensoren ohne magnetischen Kern (Aufbauvariante 3), Abstand zum Messobjekt: $100\text{ }\mu\text{m}$

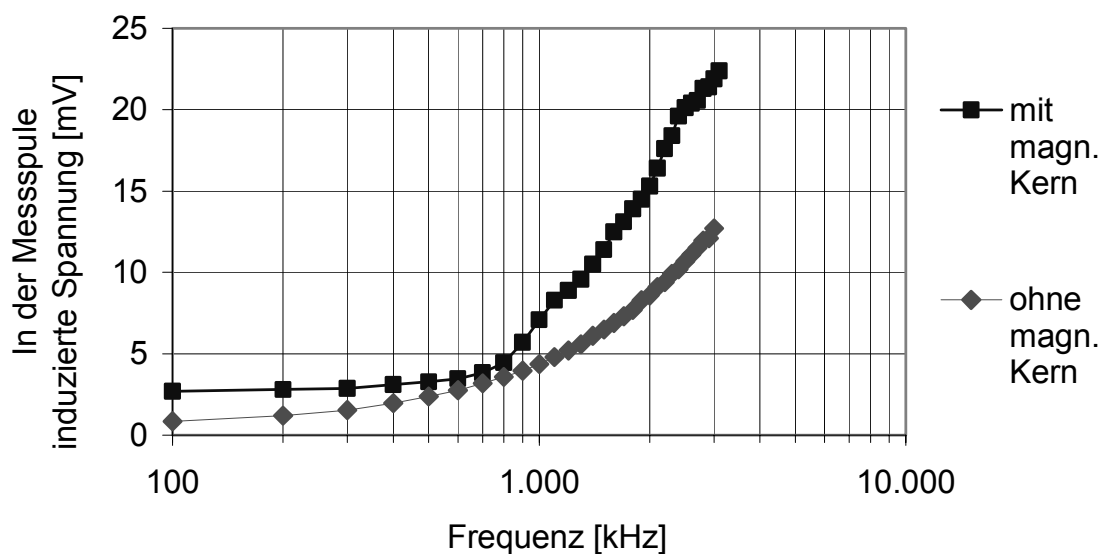
In der zweiten Versuchsreihe erfolgt die Vermessung von Sensoren mit magnetischem Kern. Es wurde der gleiche Abstand zwischen Sensor und Messobjekt wie bei der ersten Versuchsreihe eingestellt. Das Messobjekt wird beibehalten. Der Frequenzbereich liegt zwischen 100 kHz und 30 MHz . Auch hier wird der Abstand zwischen Sensor und Messobjekt während der Messung konstant gehalten (Bild 8.11).



2005 imt 5017-076

Bild 8.11: Induzierte Spannung in der Messspule in Abhängigkeit von der Frequenz bei den Sensoren mit magnetischem Kern (Aufbauvariante 4), Abstand zum Messobjekt: 100 μm

Bei der Auswertung beider Versuchsreihen ist zu beobachten, dass die induzierte Spannung in der Messspule mit Erhöhung der Frequenz wächst. Beim Vergleich beider Messreihen kann man feststellen, dass die induzierte Spannung bei den Sensoren mit magnetischem Kern viel höher als bei den Sensoren ohne magnetischen Kern ist (Bild 8.12). Dieser Effekt ist durch bessere Fokussierung von Wirbelströmen im Messobjekt durch den Einsatz des magnetischen Kerns zu erklären.



2005 imt 5017-077

Bild 8.12: Vergleich der induzierten Spannung von Sensoren mit und ohne magnetischen Kern (Aufbauvariante 3 und 4), Abstand zum Messobjekt: 100 μm

Aus den Messergebnissen kann man ablesen, dass sich die induzierten Spannungen in der Messspule beim Sensor ohne magnetischen Kern konstant erhöhen. Beim Sensor mit magnetischem Kern können drei Bereiche unterschieden werden. Der erste Bereich liegt zwischen 100 kHz und 1 MHz. In diesem Bereich erhöhen sich die induzierten Spannungen sehr langsam von 2,7 auf 7,1 mV. Bei weiterer Frequenzerhöhung wachsen die Spannungen schneller an und liegen im Frequenzbereich von 1 bis 2 MHz zwischen 7,1 und 15,5 mV. Im dritten Bereich zwischen 2 und 3 MHz nimmt die Spannungssteigerung wieder ab und liegt bei 5,8 mV.

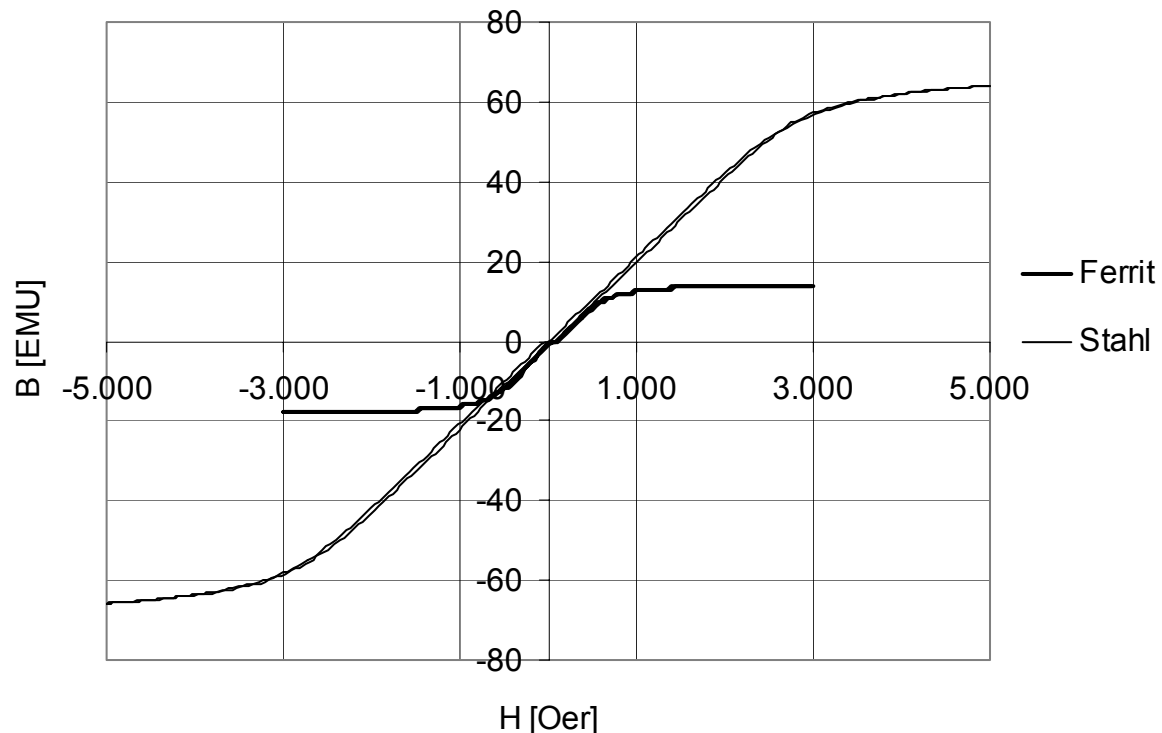
8.3.2 Abstandsmessung mit dem Wirbelstromsensor

Zu Abstandsmessungen mit dem Wirbelstromsensor werden wie bei der Messung der induzierten Spannung zwei Messreihen durchgeführt. Bei der ersten Versuchsreihe wurden Sensoren ohne magnetischen Kern getestet und bei der zweiten Sensoren mit magnetischem Kern. Bei beiden Versuchsreihen kommt dasselbe Messobjekt zum Einsatz, das genau definierte Eigenschaften besitzt. Bei jeder Messreihe wurden drei Messobjekte aus magnetischem Stahl, Ferrit und Kupfer getestet (siehe Tabelle 8.4).

Zuerst stellt man bei jeder Messung den Abstand zwischen Sensor und Objekt zunächst mit Hilfe eines Dummy-Sensors ein, um bereits bei kleinstem Abstand Messwerte zu erhalten. Zur Einstellung kleinster Abstände werden Glimmerplättchen von 10 µm Dicke verwendet, die auf dem Dummy-Sensor positioniert werden. Anschließend wird das Messobjekt bis auf Kontaktabstand an das Glimmerplättchen herangefahren. Dann wird der Dummy-Sensor mit dem Glimmerplättchen vom Messobjekt entfernt und der richtige Sensor unter dem Messobjekt positioniert. Die genauere Einstellung des Abstands erfolgt durch die Mikrometerschraube auf dem Messstand. Der Abstand zwischen dem Sensor und dem Messobjekt variiert bei beiden Versuchsreihen im Bereich zwischen 10 bis 1.000 µm.

Tabelle 8.4: Eigenschaften von Messobjekten

Materialien für Messobjekt	spezifische Leitfähigkeit [m/(Ωmm ²)]	Relative Permeabilität
Stahl	2	3,75
Ferrit	<10 ⁻⁶	2000
Kupfer	58,2	1



2005 int 5017-078

Bild 8.13: Hysteresekurve von Stahl und Ferrit

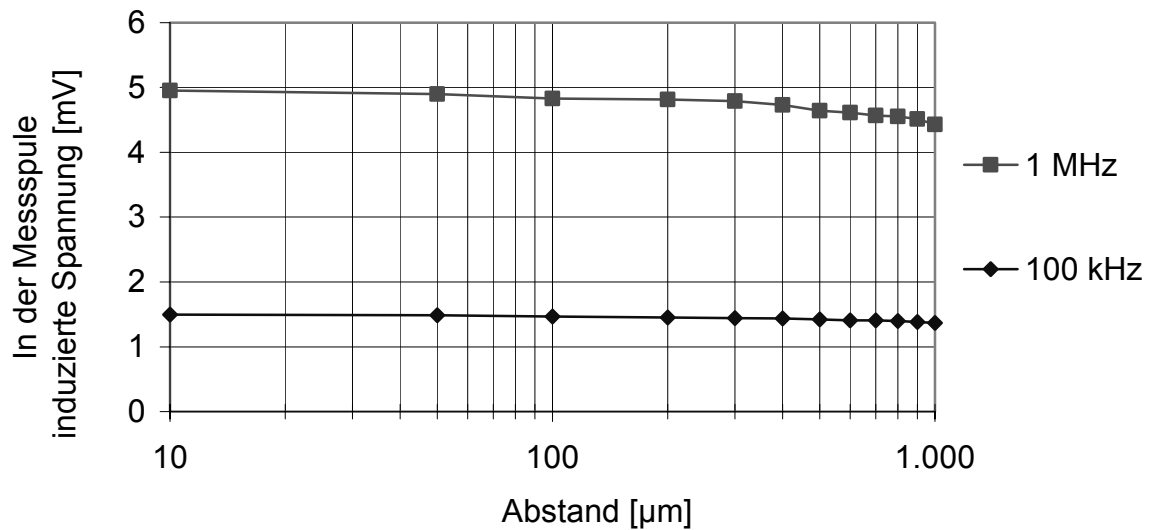
Bei den Proben aus Stahl und Ferrit können magnetische Eigenschaften mit Hilfe eines Vibrationsmagnetometers verifiziert werden. Bei der Messung wird die Hysteresekurve ermittelt (Bild 8.13) und die Werte der Koerzitivität und Sättigung abgelesen.

8.3.2.1 Messung mit magnetischem Stahl

Bei der Messung werden zuerst Sensoren ohne magnetischen Kern vermessen. Als Nächstes testet man Sensoren mit magnetischem Kern und vergleicht die Ergebnisse beider Messungen. Bei den Messungen wird dasselbe Messobjekt verwendet (Eigenschaften siehe 8.3.2).

Bei den Messungen mit Wirbelstromsensoren ohne magnetischen Kern werden Untersuchungen für zwei Frequenzen durchgeführt. Die erste Messfrequenz wird auf 100 kHz eingestellt. Bei dieser Frequenz ändert sich die induzierte Spannung nicht wesentlich. Die induzierte Spannung in der Messspule beim Abstand von 10 μm zwischen Sensor und Messobjekt liegt bei 1,5 mV. Bei weiterer Entfernung des Sensors vom Messobjekt auf 1 mm sinkt die Spannung auf 1,37 mV (Bild 8.14).

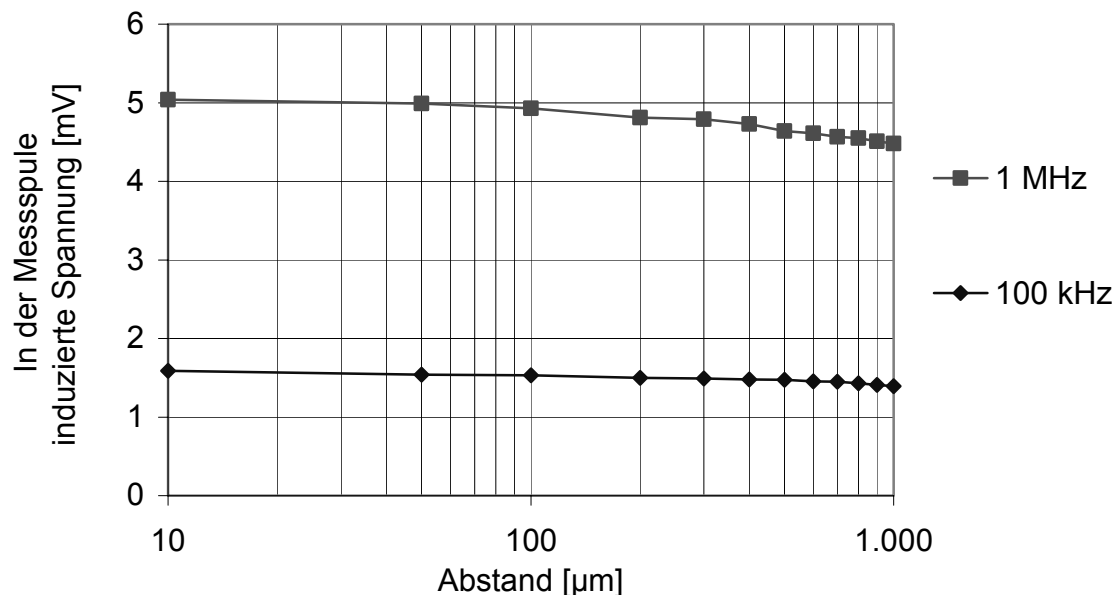
Bei der Messung mit Wirbelstromsensoren ohne magnetischen Kern bei höheren Frequenzen erhöhen sich die Spannungswerte im Vergleich zu Messungen bei niedrigeren Frequenzen. Die induzierte Spannung in der Messspule bei der Messfrequenz von 1 MHz erreicht den Wert 4,95 mV und sinkt bei der Abstandserhöhung auf 1 mm auf 4,43 mV (Bild 8.14).



2005 imt 5017-079

Bild 8.14: Abstandsmessung zwischen Sensor ohne magnetischen Kern (Aufbauvariante 3) und einem Messobjekt aus magnetischem Stahl

Die Differenz zwischen den Spannungen bei minimalem (10 μm) und maximalem (1.000 μm) Abstand während der Messungen mit der Frequenz von 100 kHz beträgt 0,13 mV. Bei Erhöhung der Arbeitsfrequenz auf 1 MHz liegt diese Differenz bei 0,52 mV.



2005 imt 5017-080

Bild 8.15: Abstandsmessung zwischen Sensor mit magnetischem Kern (Aufbauvariante 4) und einem Messobjekt aus magnetischem Stahl

Bei der zweiten Messreihe werden Sensoren mit magnetischem Kern untersucht. Bei diesen Untersuchungen soll man, wie bei der ersten Messreihe, in der Messspule induzierte Spannungen bei der Einstellung unterschiedlicher

Abstände aufnehmen. Die Messfrequenzen werden auf 100 kHz bzw. 1 MHz eingestellt (Bild 8.15).

Es konnte die gleiche Abhängigkeit zwischen der Messfrequenz und der Höhe der induzierten Spannung, wie bei den Messungen mit Sensoren ohne magnetischen Kern, festgestellt werden. Die Tendenz zu niedrigeren Spannungen bei Abstandserhöhung bei den unterschiedlichen Frequenzen ist jedoch noch deutlicher als beim Aufbau ohne magnetischen Kern. Während die Differenz zwischen den Spannungen bei minimalem (10 μm) und maximalem (1.000 μm) Abstand während der Messungen mit der Frequenz 100 kHz nur 0,2 mV beträgt, erhöht sich die Differenz bei einer Arbeitsfrequenz von 1 MHz auf 0,6 mV.

Beim Vergleich zweier Messungen mit demselben Messobjekt aus magnetischem Stahl bei unterschiedlichen Frequenzen kann man feststellen, dass die induzierte Spannung in der Messspule bei 1 MHz höher liegt als bei 100 kHz, da die Spannungsdifferenzen bei den unterschiedlichen Abständen größer sind.

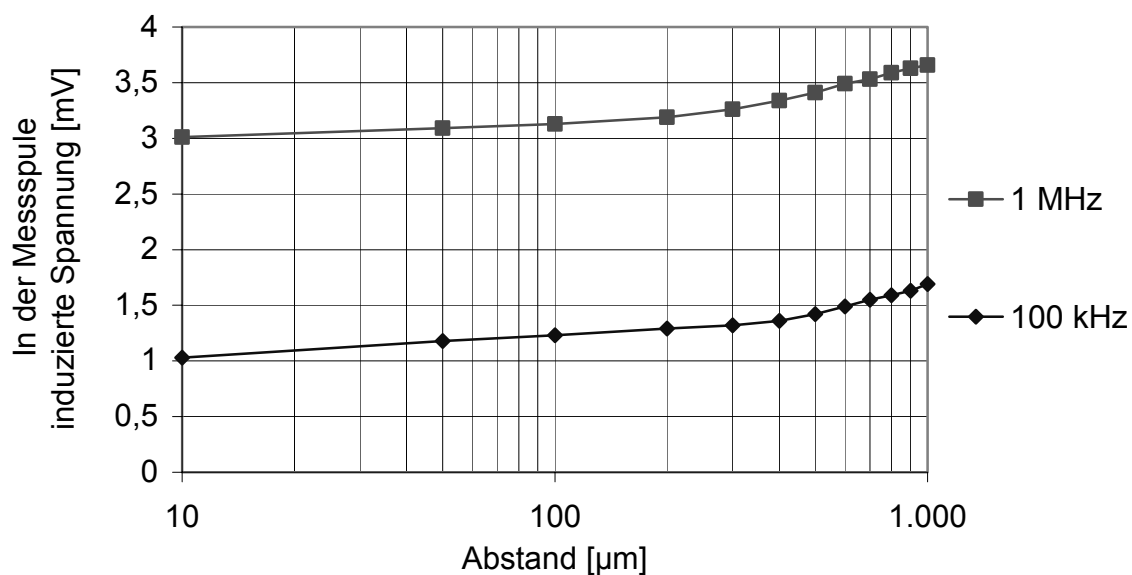
Beim Vergleich der Untersuchungen von Sensoren mit unterschiedlichem Aufbau wird festgestellt, dass die in der Messspule induzierte Spannung beim Aufbau mit magnetischem Kern höher als beim Aufbau ohne magnetischen Kern ist. Das Vorhandensein eines magnetischen Kerns erlaubt die bessere Fokussierung von magnetischen Feldern im Messobjekt, was einen Unterschied zwischen den Spannungen bei der Variation der Abstände ergibt.

8.3.2.2 Messung mit schlecht leitendem, magnetischem Objekt

Als Material für das Messobjekt wird bei dieser Messreihe Ferrit ausgewählt. Ferrit weist gute magnetische Eigenschaften auf und ist sehr schlecht elektrisch leitend (Eigenschaften siehe Tabelle 8.4). Wie bei der Messung mit magnetischem Stahl werden zwei Versuchsreihen vorgenommen, in denen Sensoren ohne und mit magnetischem Kern getestet werden. Bei allen Messungen wird dasselbe Messobjekt verwendet.

Bei den Messungen mit Wirbelstromsensoren ohne magnetischen Kern werden Untersuchungen bei zwei Frequenzen durchgeführt (Bild 8.16). Die Messfrequenz wird zunächst auf 100 kHz eingestellt. Bei diesen Messungen vergrößert sich die induzierte Spannung von 1,03 mV auf 1,69 mV in Abhängigkeit vom gewählten Abstand.

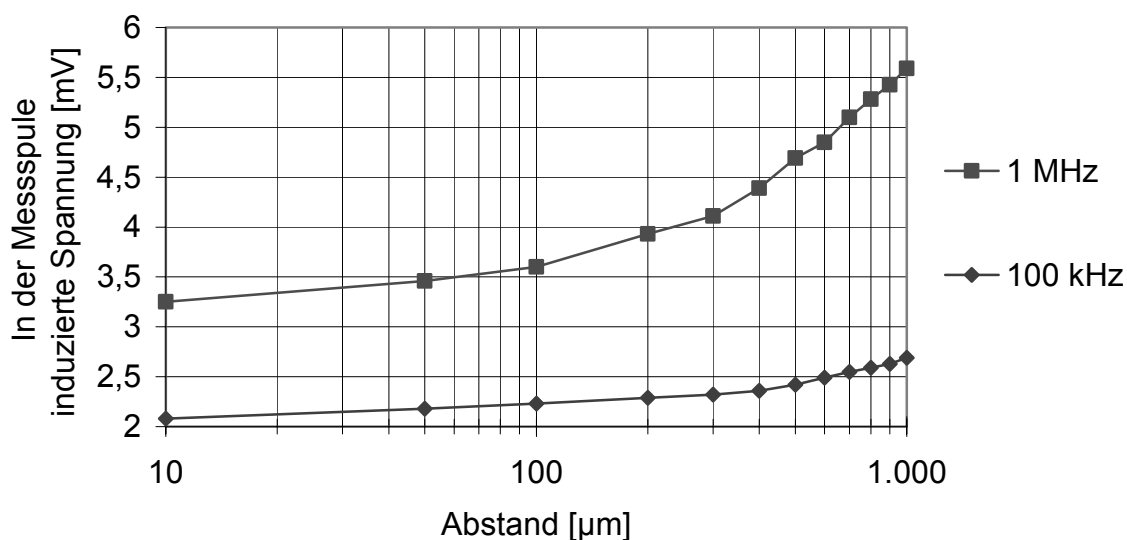
Dieser Versuch wird bei einer zweiten Frequenz von 1 MHz wiederholt. Die Ergebnisse zeigen die gleiche Tendenz zur Spannungserhöhung bei Abstandsvergrößerung. In diesem Fall steigen die induzierten Spannungen von 3,01 mV auf 3,658 mV. Ein Vergleich der Spannungsänderungen zwischen dem minimalen und dem maximalen Abstand bei 100 kHz und 1 MHz ergibt die Werte 0,648 mV und 0,65 mV.



2005 int 5017-081

Bild 8.16: Abstandsmessung mit dem Sensor ohne magnetischen Kern (Aufbauvariante 3) und einem Messobjekt aus Ferrit

Bei der zweiten Messreihe setzt man Sensoren mit magnetischem Kern ein. Bei diesen Untersuchungen werden (wie bei der ersten Messreihe) in der Messspule induzierte Spannungen bei der Einstellung unterschiedlicher Abstände abgelesen. Die Messfrequenzen betragen dabei 100 kHz und 1 MHz (Bild 8.17).



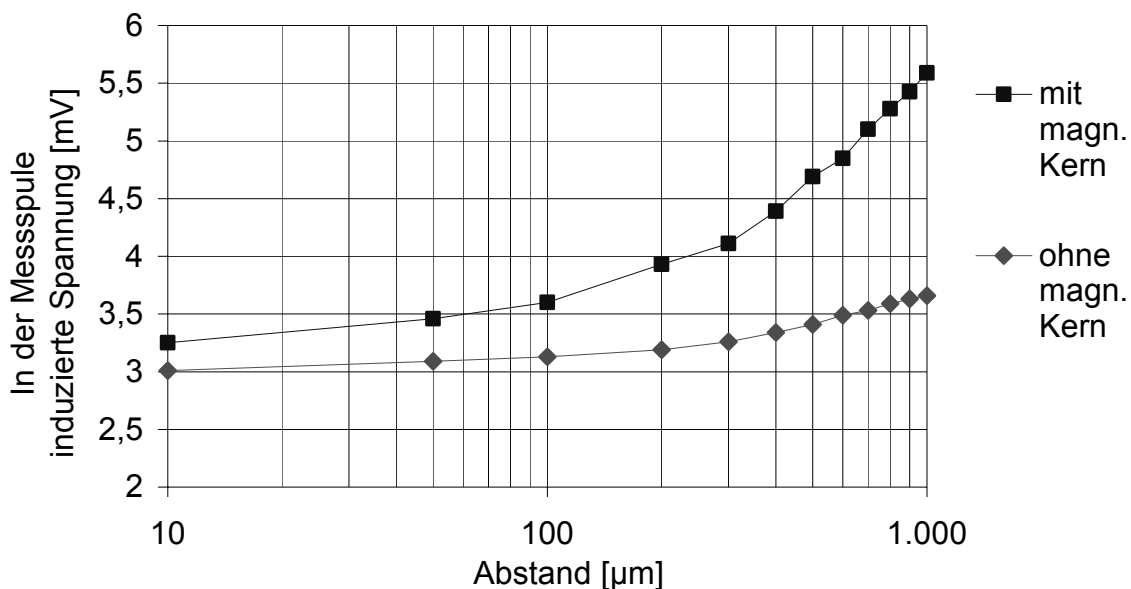
2005 int 5017-082

Bild 8.17: Abstandsmessung mit dem Sensor mit magnetischem Kern (Aufbauvariante 4) und dem Messobjekt aus Ferrit

Bei den Messungen bei der Frequenz 100 kHz wächst die in der Messspule induzierte Spannung von 2,08 mV in Abhängigkeit vom Abstand auf 2,69 mV. Bei Erhöhung der Messfrequenz auf 1 MHz steigt auch die induzierte Spannung. In diesem Fall beträgt die Spannung 3,25 mV beim minimalen Abstand von 10 μm und 5,59 mV beim maximal eingestellten Abstand von 1.000 μm .

Die Differenz zwischen der minimalen und der maximalen gemessenen Spannung bei minimalem und maximalem Abstand bei 100 kHz beträgt 0,61 mV. Bei der Frequenz von 1 MHz erhöht sich diese Differenz auf 2,34 mV.

Beim Vergleich der Messungen mit unterschiedlich aufgebauten Sensoren (ohne und mit magnetischem Kern) kann man die gleiche Tendenz zur Spannungszunahme bei der Entfernung des Sensors vom Messobjekt feststellen.



2005 int 5017-083

Bild 8.18: Abstandsmessung mit Wirbelstromsensoren ohne und mit magnetischem Kern (Aufbauvariante 3 und 4) bei einer Arbeitsfrequenz von 1 MHz und einem Messobjekt aus Ferrit

Wenn man beide Messreihen vergleicht, wird deutlich, dass sich die Differenz zwischen der induzierten Spannung bei maximalem und minimalem Abstand und unterschiedlichen Frequenzen beim Aufbau ohne magnetischen Kern nahezu angleicht. Beim Aufbau mit magnetischem Kern kann diese Aussage nicht bestätigt werden. In dem Fall, dass die Messungen bei niedrigen Frequenzen durchgeführt werden, sind die Werte der induzierten Spannungen höher als beim Aufbau ohne magnetischen Kern. Die Differenzen zwischen den induzierten Spannungen bei maximalem und minimalem Abstand beim Sensor mit und ohne magnetischen Kern und Messobjekt aus Ferrit sind dagegen vergleichbar. Bei höheren Frequenzen steigt nicht nur die induzierte Spannung, sondern auch die Werte der maximalen und minimalen Spannung erhöhen sich (Bild 8.18). Der Unterschied zwischen den

resultierenden Spannungen bei Sensoren verschiedenen Aufbaus wird besonders ab einem Abstand von 300 μm deutlich.

Aus Bild 8.18 kann man ablesen, dass der Aufbau ohne magnetischen Kern bei der Abstandsmessung schlechtere Ergebnisse als der Aufbau mit magnetischem Kern liefert. Darüber hinaus ergaben Messungen am magnetischen, schlecht leitenden Messobjekt mit dem Sensoraufbau mit magnetischem Kern bei der Frequenz von 1 MHz höhere Messwerte als die Messungen bei niedrigeren Frequenzen mit dem Sensor ohne magnetischen Kern.

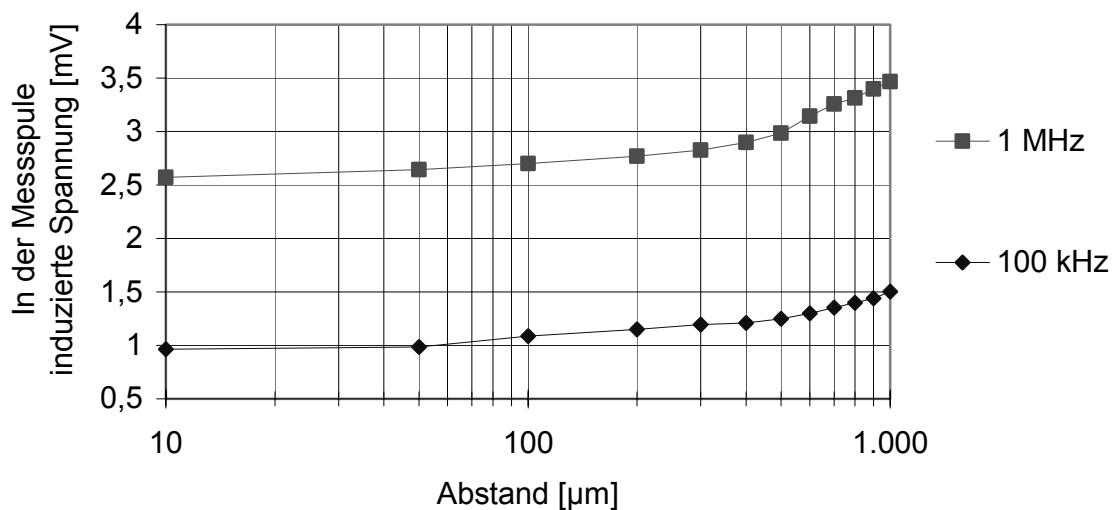
8.3.2.3 Messung mit leitendem, nichtmagnetischem Objekt

Bei der Messung werden zuerst Sensoren ohne magnetischen Kern vermessen. Als zweites werden Sensoren mit magnetischem Kern getestet und die Ergebnisse beider Messungen miteinander verglichen. Bei den Messungen wird ein Messobjekt aus Kupfer verwendet (Eigenschaften siehe 8.3.2).

Bei der Abstandsmessung mit unterschiedlichem Aufbau des Wirbelstromsensors (ohne und mit magnetischem Kern) und dem Messobjekt aus Kupfer werden Untersuchungen der in der Messspule induzierten Spannung bei unterschiedlichen Frequenzen durchgeführt. Es werden die Frequenzen 100 kHz und 1 MHz ausgewählt.

Beim Aufbau ohne magnetischen Kern und einer Messfrequenz von 100 kHz liegen die Werte der induzierten Spannung beim Abstand von 10 μm bei 0,9 mV. Bei Abstandserhöhung auf 100 μm werden weitere Werte der induzierten Spannung vermessen. Der maximale Abstand zwischen Sensor und Messobjekt beträgt dabei 1.000 μm . Aus dem Bild 8.19 kann man entnehmen, dass sich die in der Messspule induzierte Spannung vergrößert. Beim maximalen Abstand von 1.000 μm wird eine Spannung von 1,5 μV gemessen, bei den Messungen mit dem Wirbelstromsensor ohne magnetischen Kern und einer Arbeitsfrequenz von 100 kHz vergrößert sich die in der Messspule induzierte Spannung auf 0,42 mV.

Dieser Versuch wird bei einer Frequenz von 1 MHz wiederholt. Die Ergebnisse zeigen die gleiche Tendenz der Spannungserhöhung wie bei einer Abstandsvergrößerung. Der Verlauf der in der Messspule induzierten Spannung bei Messungen bei höherer Frequenz ist identisch mit der Messung bei niedrigerer Frequenz: Die Spannungswerte liegen jedoch insgesamt höher als bei den vorherigen Messungen. Die Differenz zwischen den Spannungen bei maximal und minimal eingestelltem Abstand ist ebenfalls größer und beträgt 0,92 mV. In diesem Fall beträgt die Spannung bei einem Abstand von 10 μm und 1 MHz bereits 2,56 mV, was um 1,66 mV höher ist als bei demselben Abstand bei 100 MHz. Der Spannungsunterschied beim Vergleich zweier Messungen steigt nicht nur mit der Frequenz, sondern auch mit dem Abstand.



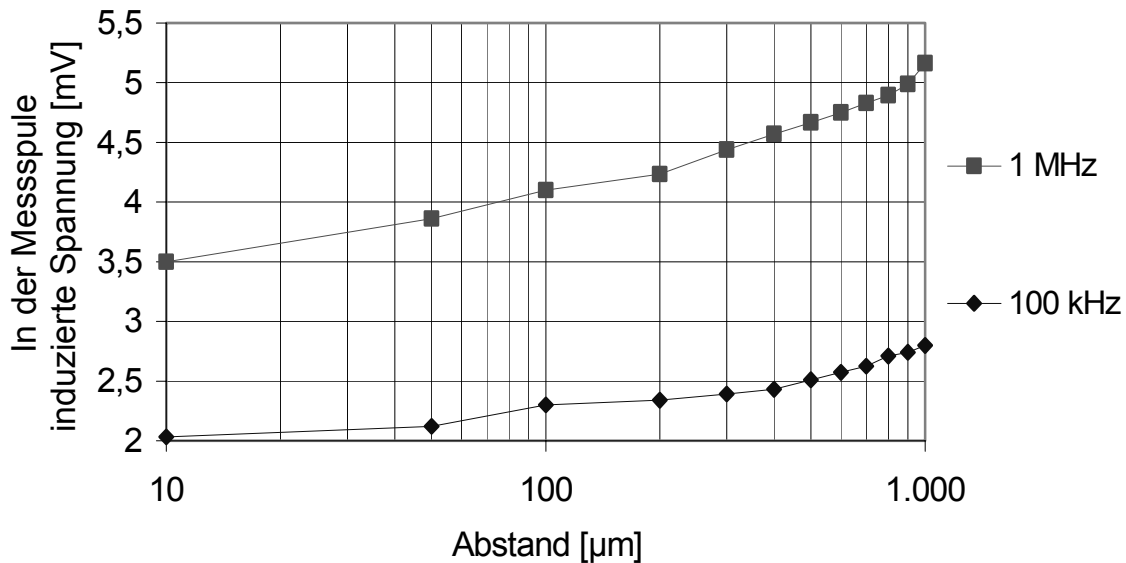
2005 int 5017-084

Bild 8.19: Abstandsmessung mit dem Sensor ohne magnetischen Kern (Aufbauvariante 3) und dem Messobjekt aus Kupfer

Während der Spannungsunterschied bei der Einstellung des minimalen und maximalen Abstands zwischen Sensor und Messobjekt bei 100 kHz nur 0,6 mV beträgt, macht er bei der Arbeitsfrequenz von 1 MHz schon 0,92 mV aus (Bild 8.19).

In weiteren Untersuchungen wird der zweite Aufbau des Wirbelstromsensors - mit magnetischem Kern - untersucht. Bei diesen Untersuchungen werden, wie bei der ersten Messreihe, in der Messspule induzierte Spannungen bei der Einstellung unterschiedlicher Abstände gemessen. Am Bild 8.20 kann man erkennen, dass sich mit Erhöhung der Arbeitsfrequenz bei der Abstandsmessung zwischen dem Wirbelstromsensor mit magnetischem Kern und dem Messobjekt aus Kupfer auch die induzierte Spannung erhöht.

Zuerst wird die Arbeitsfrequenz von 100 kHz verwendet und der Abstand zwischen 10 μm und 1.000 μm variiert. Wie aus dem Bild 8.20 zu sehen ist, steigen die Werte der induzierten Spannung mit Vergrößerung des Abstands zwischen dem Sensor und dem Messobjekt an. Die Spannung liegt beim minimalen Abstand von 10 μm bei 2,03 mV und steigt bei Erhöhung des Abstands. Beim maximalen Abstand von 1.000 μm erreicht dieser Wert 2,79 mV. Der Unterschied zwischen der in der Messspule induzierten Spannung bei minimal und maximal eingestellten Abstand beim Aufbau mit magnetischem Kern und der Arbeitsfrequenz von 100 kHz beträgt 0,76 mV, was höher ist als bei der Messung an demselben Messobjekt mit dem Sensoraufbau ohne magnetischen Kern. Dieser Versuch wird bei der Frequenz von 1 MHz wiederholt. Die Ergebnisse zeigen die gleiche Tendenz zur Spannungserhöhung bei Abstandsvergrößerung wie bei der niedrigeren Frequenz (Bild 8.20).



2005 int 5017-085

Bild 8.20: Abstandsmessung zwischen dem Sensor mit magnetischem Kern (Aufbauvariante 4) und dem Messobjekt aus Kupfer

In diesem Fall betragen die Werte der induzierten Spannung bei einem Abstand von 10 μm zwischen Sensor und Messobjekt bei der Arbeitsfrequenz von 1 MHz 3,5 mV. Bei zunehmender Entfernung des Messobjekts vom Sensor erhöht sich die induzierte Spannung und erreicht beim Abstand von 1.000 μm den Wert 5,16 mV. Die Differenz zwischen der in der Messspule induzierten Spannung bei maximalem und minimalem Abstand von der Probe beträgt in diesem Fall 1,66 mV.

Wenn man beide Messreihen vergleicht, wird deutlich, dass die Differenz zwischen der induzierten Spannung bei maximalem und minimalem Abstand und unterschiedlichen Sensorvarianten bei niedrigeren Frequenzen fast denselben Wert aufweist. Bei der Frequenzerhöhung auf 1 MHz erhöhen sich nicht nur die Werte der induzierten Spannung bei Abstandserhöhung, sondern auch die Differenz zwischen den Spannungswerten bei maximalem und minimalem Abstand in Abhängigkeit vom Sensoraufbau.

Beim Vergleich der Spannungswerte bei maximalem und minimalem Abstand und unterschiedlichem Aufbau des Wirbelstromsensors kann man eine Erhöhung der Spannungswerte feststellen: Während beim Aufbau ohne magnetischen Kern die Differenz zwischen dem minimalen und maximalen Spannungswert bei 1 MHz nur 0,92 mV beträgt, steigt diese bei Vorhandensein eines magnetischen Kerns auf 1,66 mV.

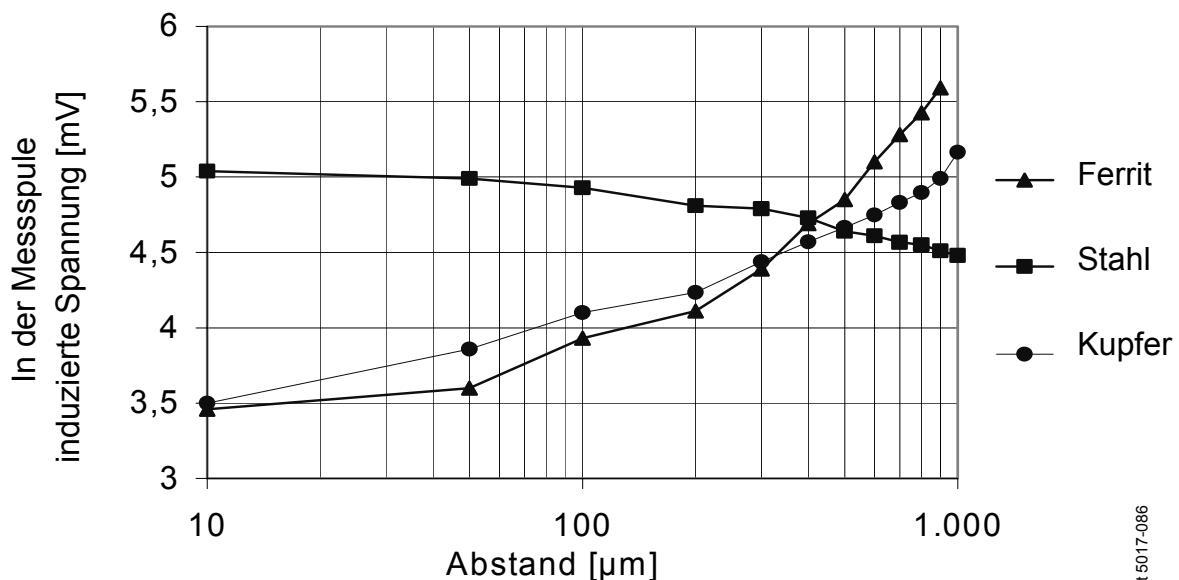
8.3.2.4 Vergleich der Abstandsmessungen mit unterschiedlichen Materialien

Bei den Abstandsmessungen mit Wirbelstromsensoren werden zwei verschiedene Ausführungen des Sensors verwendet. Der erste Aufbau besteht nur aus doppelagigen Spulen, beim zweiten Aufbau ist ein magnetischer Kern integriert.

Aus den Versuchen kann man entnehmen, dass der Aufbau des Wirbelstromsensors mit magnetischem Kern viel bessere Ergebnisse liefert als der ohne. Das Vorhandensein des magnetischen Kerns bewirkt die Fokussierung des magnetischen Felds in das Messobjekt, so dass höhere induzierte Spannungen gemessen werden können.

Auch die Frequenzauswahl hat einen großen Einfluss auf die in der Messspule induzierte Spannung. Messungen bei höheren Frequenzen ergeben höhere Spannungswerte. Bei der Arbeitsfrequenz von 1 MHz werden die besten Ergebnisse erzielt. Die induzierte Spannung wächst schneller als linear mit der Frequenz.

Beim Vergleich der Abstandsmessungen mit drei unterschiedlichen Materialien kann man feststellen, dass die induzierte Spannung beim Messobjekt aus Stahl mit zunehmendem Abstand sinkt und bei den Messobjekten aus Kupfer und Ferrit ansteigt (Bild 8.21).



2005 lmt 5017-086

Bild 8.21: Abstandsmessung mit dem Wirbelstromsensor mit magnetischem Kern (Aufbauvariante 4) und Messobjekten aus Stahl, Ferrit und Kupfer bei der Arbeitsfrequenz 1 MHz

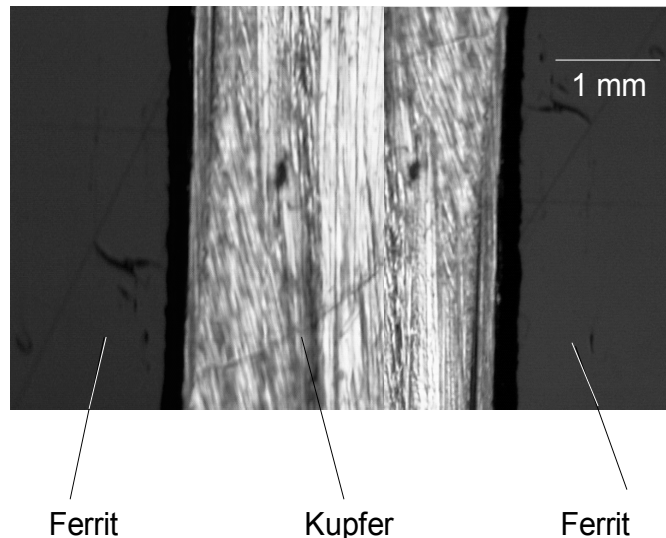
Obwohl bei beiden Messobjekten aus Kupfer und Ferrit eine ansteigende Tendenz beobachtet wird, wird die Spannungsdifferenz bei Abstandserhöhung immer größer. Während die in der Messspule induzierte Spannung beim Messobjekt aus Kupfer bei der Abstandsänderung von 10 auf 1.000 μm 1,66 mV beträgt, ergibt sich beim Messobjekt aus Ferrit der Wert 2,34 mV.

Dennoch kann man feststellen, dass der Aufbau des Wirbelstromsensors mit magnetischem Kern für die Abstandsmessung unterschiedlicher Materialien gut geeignet ist. Die Verwendung eines magnetischen Kerns ermöglicht den Aufbau

eines mikrotechnischen Sensors für die Abstandsmessung auf bis zu 1 mm durch die bessere Fokussierung des Magnetfeldes im Messobjekt.

8.3.3 Wegmessung bei Schichten aus unterschiedlichen Materialien

Diese Versuchsreihe soll zeigen, dass der Sensor unterschiedliche Materialien in der Probe identifizieren kann. Bei der Aufnahme der in der Messspule induzierten Spannung können die Lage und die Größe der untersuchten Materialien ausgewertet werden.



2005 imt 5017-087

Bild 8.22: Messobjekt bei der Materialerfassung

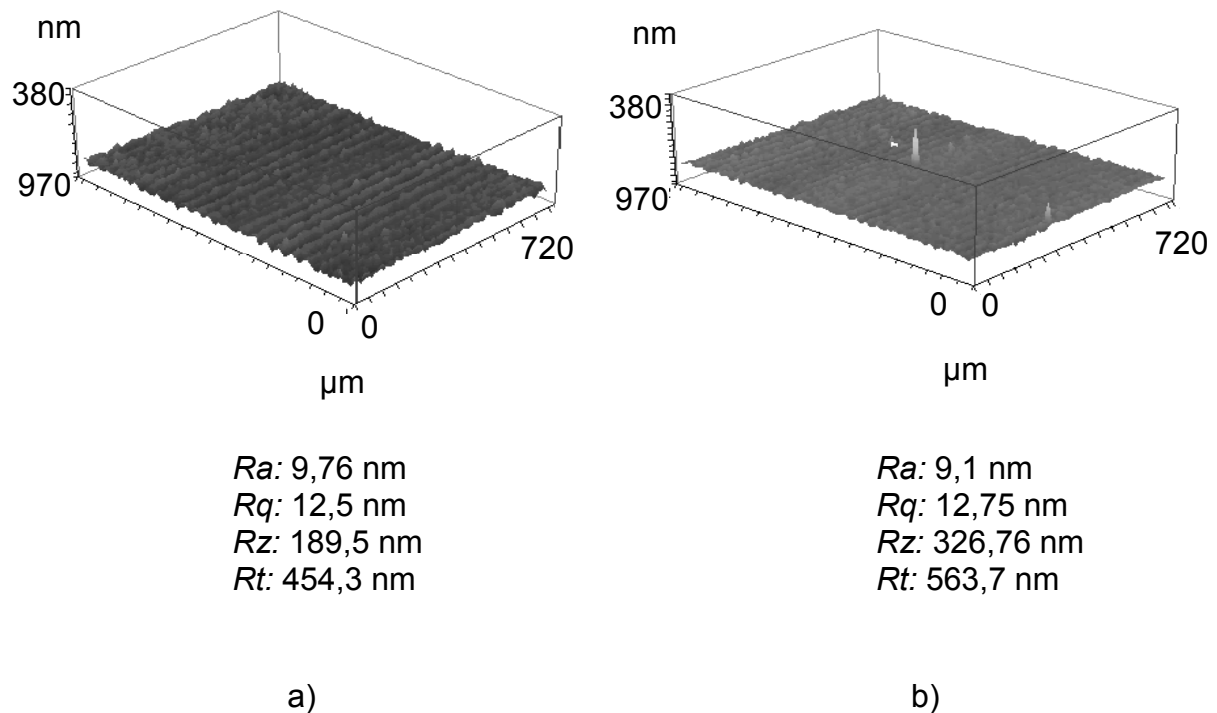
Bei dieser Untersuchung wird eine aus zwei unterschiedlichen Materialien zusammengesetzte Probe herangezogen (Bild 8.22). Die Probe besteht aus zwei Ferritstreifen und einem Kupferstreifen, der zwischen den Ferritstücken angeordnet ist. Die Streifen sind mit einer doppelseitigen Klebefolie miteinander verbunden. Der Vorteil dieser Folie besteht in ihrer genau definierten Schichtdicke von $0,25\ \mu\text{m}$. Nach der Herstellung wird die Probe mit einem Weißlichtinterferometer auf ihre Oberflächeneigenschaften untersucht. Das Bild 8.23 zeigt das Ergebnis dieser Untersuchung.

Aus dem Bild 8.23 kann man entnehmen, dass die Rauheit beider Proben vergleichbar ist. Auch die Bereiche zwischen den metallischen Proben wurden genauer vermessen. Der Abstand zwischen den Proben beträgt $0,5\ \mu\text{m}$.

Aus den Abstandsmessungen (Bild 8.21) kann man folgern, dass sich die Unterschiede zwischen der in den unterschiedlichen Materialien induzierten Spannungen bei Abstandserhöhung ändern. Bei kleinerem Abstand sind die Werte maximal, verkleinern sich mit zunehmendem Abstand und erreichen ihr Minimum bei $500\ \mu\text{m}$. Bei weiterer Entfernung des Sensors von der Probe steigt die Spannung wieder an. Dieser Effekt ist nützlich bei der Materialerfassung. Um deutlichere

Ergebnisse zu bekommen, sollte ein möglichst kleiner Abstand zwischen der Probe und dem Messobjekt eingestellt werden.

Als Messabstand wurde bei der Materialerfassung 100 μm ausgewählt, die Arbeitsfrequenz betrug 1 MHz. Bild 8.24 zeigt die Ergebnisse der Materialerfassung mit dem Wirbelstromsensor.

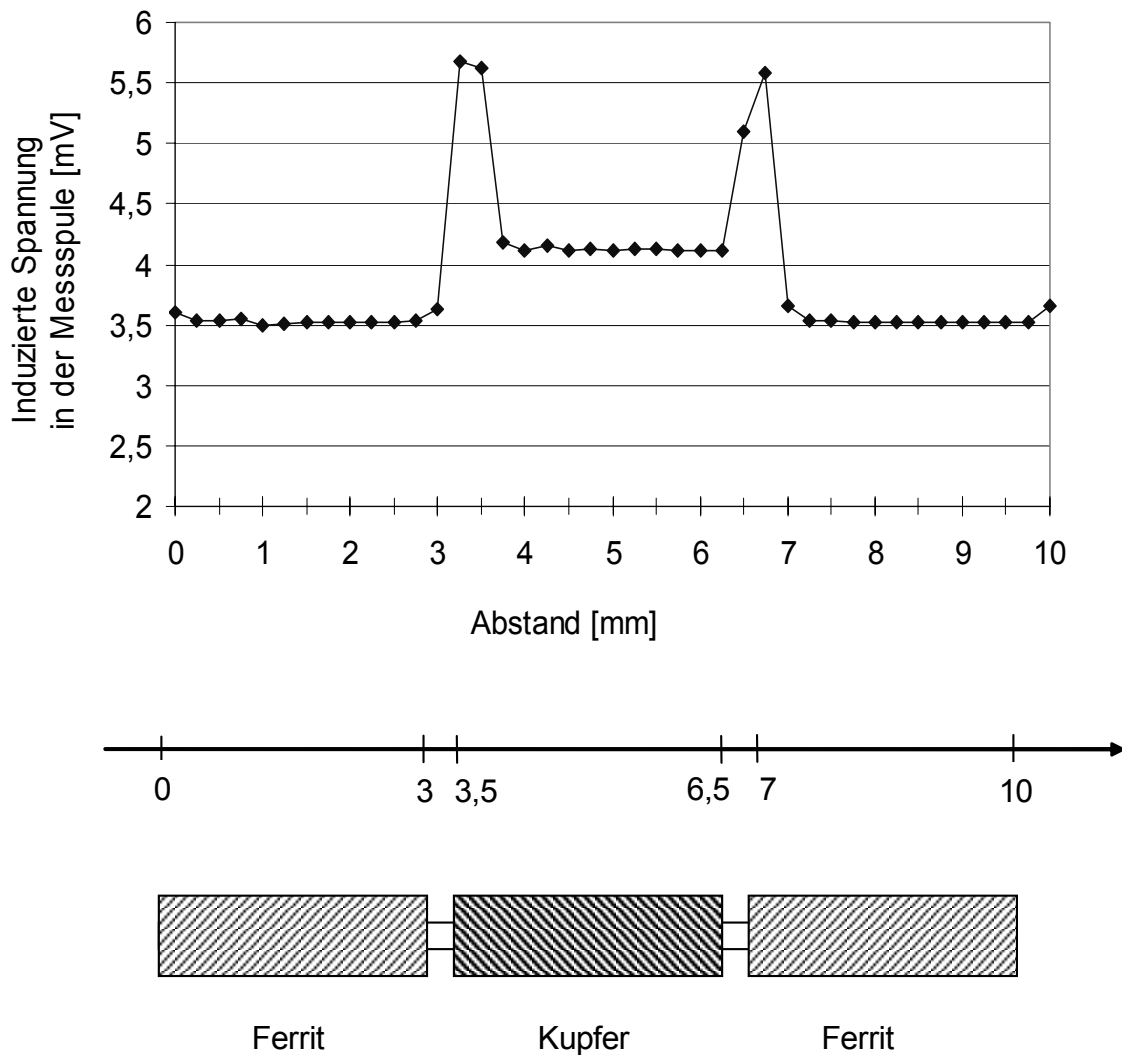


2005 lmt 5017-088

Bild 8.23: Weißlichtinterferometrische Aufnahme der Messprobenoberfläche a) Ferrit, b) Kupfer

Aus dem Bild 8.24 kann man entnehmen, dass ein deutlicher Unterschied zwischen den Materialien besteht. Der Sensor erkennt auch Abstände zwischen den Materialien. Beim Vergleich zwischen mit dem Wirbelstromsensor und mit einem Tastschnittgerät gemessenen Materiallängen kann man eine sehr gute Übereinstimmung feststellen.

Wenn man die in der Messspule induzierte Spannung in Abhängigkeit von der Sensorposition ansieht, beobachtet man eine Spannungserhöhung an Materialgrenzen. Diese Spannungserhöhung ist auf Grenzeffekte zurückzuführen, da sich die Spule nur teilweise unter dem Material befindet und erhöhte Spannungswerte ausgibt.



2005 int 5017-089

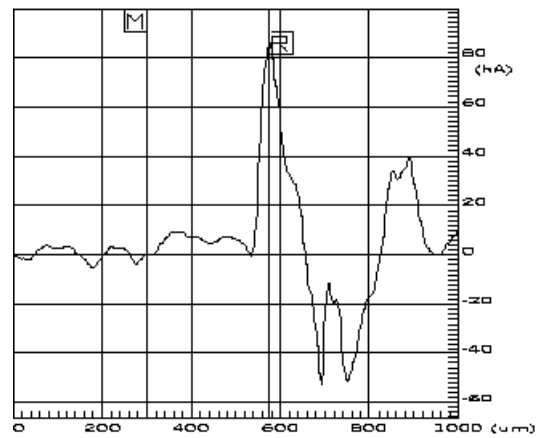
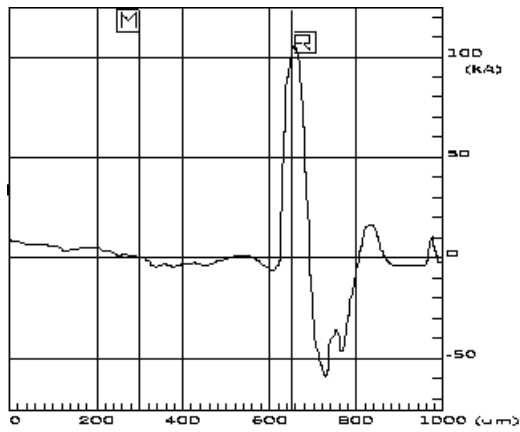
2005 int 5017-090

Bild 8.24: Materialerfassung mit dem Wirbelstromsensor

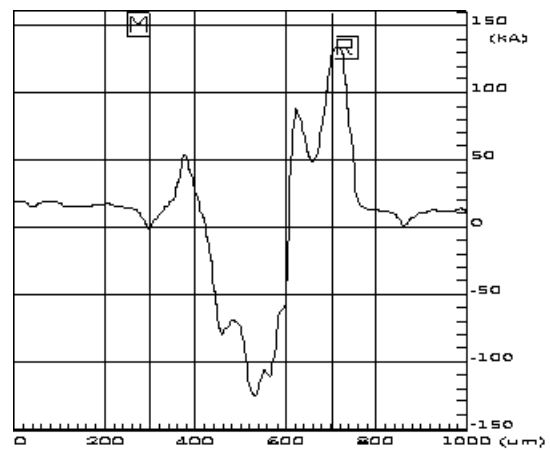
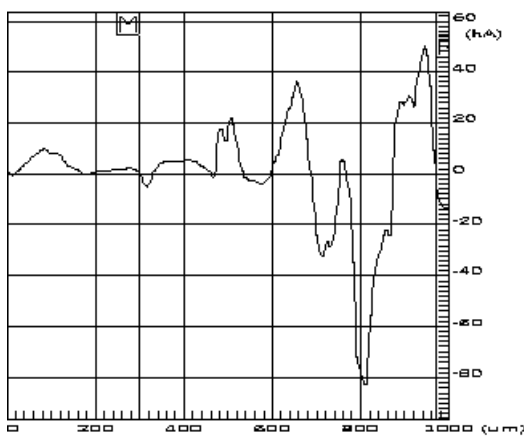
8.3.4 Erkennung von Oberflächenfehlern bei Cu- und Stahl Messobjekten

Obwohl der Wirbelstromsensor für Abstandsmessung eingesetzt wurde, soll seine Eignung zur Erkennung von Werkstoffdefekten hier untersucht werden. Für die Erkennung von Oberflächenfehlern mit dem Wirbelstromsensor wurden zwei Messobjekte ausgewählt.

Die Größe der Messobjekte betrug ca. 5 x 10 mm. Auf der Oberfläche jedes Messobjektes wurde mit Hilfe eines Diamantstiftes ein Kratzer erzeugt. Größe und Profil dieses Fehlers wurde mit dem Tastschnittgerät mehrmals vermessen und ausgewertet. Bild 8.25 zeigt Profile der Fehler a) Kupfer und b) Stahl.

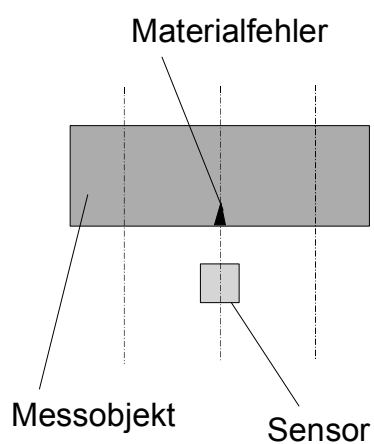


a) Kupfer

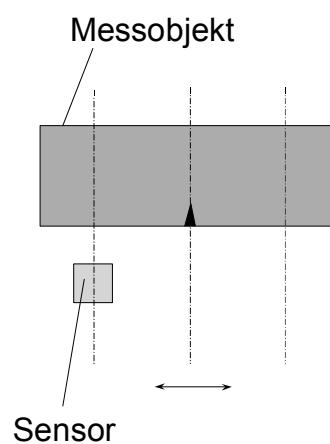


b) Stahl

Bild 8.25: Fehlerprofil



a) Null-Position

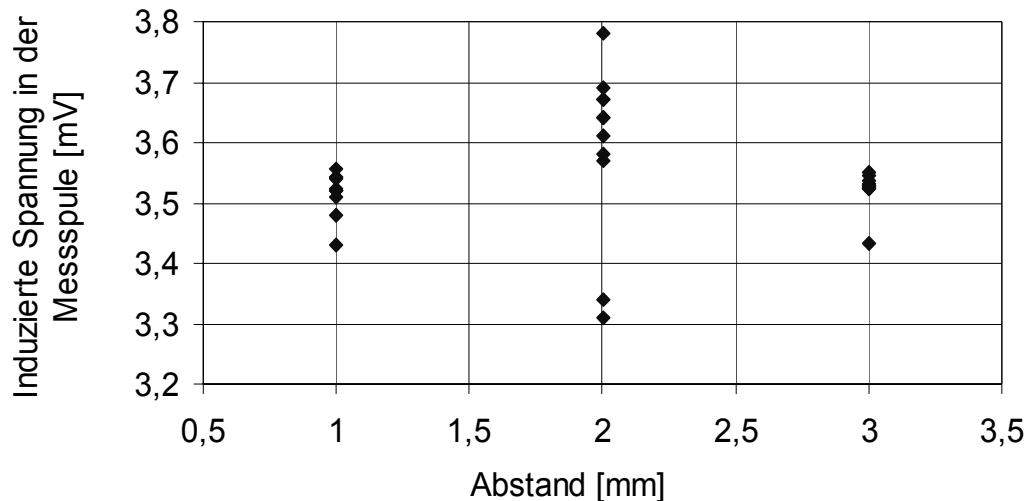


b) Messweg

Bild 8.26: Messwegeinstellung

2005 imt 5017-091

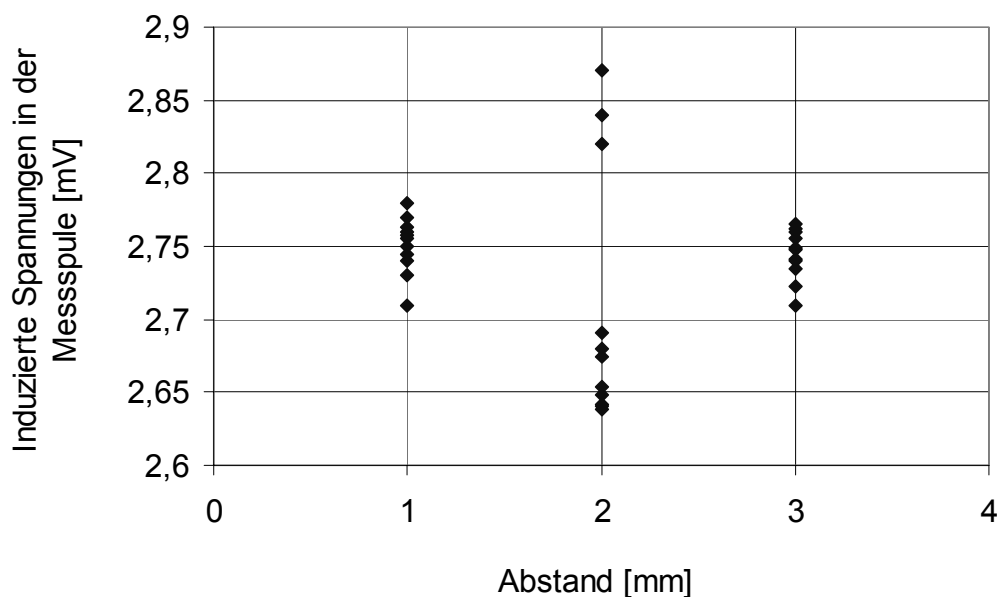
2005 imt 5017-092



2005 imt 5017-093

Bild 8.27: Fehlersuche beim Messobjekt aus Kupfer

Bei der Deklaration von Oberflächenfehlern mit dem Wirbelstromsensor wird die in der Messspule induzierte Spannung gemessen. Um diese Messungen durchzuführen, werden Messobjekt und Sensor so positioniert, dass sich die Fehlerstelle des Messobjektes gegenüber der Mitte des Sensors befindet. Der Abstand zwischen Sensor und Messobjekt wird auf 50 μm eingestellt. Die Arbeitsfrequenz beträgt 500 kHz. Die Probe bewegt sich während der Messung. Der Messweg wird auf 2 mm eingestellt, so dass die Fehlerstelle in der Mitte des Messweges liegt (Bild 8.26). Bild 8.27 präsentiert die Messergebnisse der Messung mit dem Kupfermessobjekt. Im Bild kann man erkennen, dass sich die in der Messspule induzierte Spannung an der Fehlstelle erhöht und die Position des Fehlers anzeigt.



2005 imt 5017-094

Bild 8.28: Fehlermessung beim Messobjekt aus Stahl

Das gleiche Ergebnis wird auch bei der Messung mit dem Stahlmessobjekt beobachtet. Im Gegensatz zum Kupfermessobjekt sinken die in der Messspule induzierten Spannungen und bestimmen die Lage des Fehlers (Bild 8.28). In beiden Fällen werden Messpunkte beobachtet, die nicht in das Messprofil passen. Beim Messobjekt aus Kupfer liegen diese bei ca. 3,33 mV und bei Stahl bei ca. 2,84 mV.

Wenn man beide Messungen an den Messobjekten aus Kupfer und Stahl vergleicht, stellt man fest, dass im Bereich des Fehlers die Messwerte in zwei Gruppen geteilt werden können. Die erste Gruppe erfasst die Werte, die bei der Messung erwartet werden, die zweite Gruppe beinhaltet die Messergebnisse, die bei der Messung als falsch erkannt werden können. Bei Kupfer sind es die Werte, die niedriger liegen als die Werte bei der Messung ohne Fehler. Bei Stahl sind es die höheren Werte im Vergleich zu der Messung ohne Fehler.

Um die Entstehung dieser Werte zu erklären, muss man den Messvorgang genauer betrachten. Bei diesen Messungen ist es nicht möglich, die Position des Sensors mikrometergenau festzulegen. Die Fehlerabmessung liegt zwischen 100 und 200 μm . Am Rand des Kratzers werden Materialerhöhungen vermessen, die bei der Fehlerherstellung entstanden und die fehlerhaften Messwerte produzierten. In diesem Fall wird der Sensor nicht genau über der Mitte des Fehlers positioniert, so dass die Materialerhöhungen am Rand gemessen werden. Da die Absolutwerte der Erhöhungen bei manchen Proben genauso groß sind wie die Risttiefe, wird bei dieser Messung nicht die Tiefe des Fehlers, sondern die Höhe des Randes gemessen.

9 Diskussion der Ergebnisse

Das Sensordesign besteht aus einem doppellagigen Spulenaufbau mit E-förmigem magnetischem Kern. Die Herausforderung beim Aufbau des Sensors besteht darin, das Bauteil möglichst kompakt und mit wenigen Prozessschritten herzustellen. Diese Aufgabe wird durch den Entwurf einer einwindigen Erregerspule gelöst. Durch diesen Spulenaufbau werden nicht nur höhere Ströme ermöglicht sondern auch ein geringerer elektrischer Widerstand gewährleistet.

Um die Störungen durch Kontaktdrähte bei der Abstandseinstellung zu vermeiden, werden die Drähte in Si-Gruben positioniert, die unterhalb der Sensorebene liegen. Diese Lösung ermöglicht den Aufbau des Wirbelstromsensors ohne Änderung des Strukturedesigns.

Die Verwendung eines Nickel-Eisen-Kerns führt zu einer Konzentration des vom Sensor erzeugten Magnetfeldes. Die Sättigungsfeldstärke des Materials sollte möglichst hoch sein, damit das Material auch bei hoher Durchflutung nicht in den magnetischen Sättigungsbereich gerät. Das für den Kernaufbau ausgewählte Material NiFe 81/19 zeichnet sich durch eine hohe Permeabilität und ein geringes Koerzitivfeld sowie einen relativ hohen spezifischen Widerstand aus und ist deshalb als Material für den Kern hervorragend geeignet. Die E-Form des Kerns ist so gestaltet, dass der magnetische Widerstand und der Wirbelstromverlust im Kern gering sind.

Technologische Entwicklungen sind im Bereich der Anwendung von Photoresists nötig, um bei jeder Struktur die optimale Resisthöhe und Auflösung zu finden. Zum Aufbau des Sensors werden vier Photoresists benötigt. Zwei Resists der Serie AZ und zwei SU-8-Photoresists. Jeder Photoresist hat einen bestimmten Schichtdickenbereich und ein Auflösungsvermögen, das strukturbhöheabhängig ist. Die SU-8 Resists sind für Isolationsschicht vorgesehen. SU-8 25 wird mit 25 µm Dicke für die Einbettung von Strukturen vor der mechanischen Bearbeitung verwendet. Der dünnere SU-8 2005 kommt bei der Strukturierung von 3 µm dicken Isolationsschichten zum Einsatz. Die AZ-Photoresists werden bei galvanischen Prozessen als strukturierte Resistmaske verwendet. Der hochviskose AZ 9260 wird bei der Herstellung von höheren Strukturen wie Kern oder Kontaktpads mit Schichtdicken von bis zu 60 µm eingesetzt. Bei der Messspule- und Viaherstellung eignet sich niederviskose AZ 5214 mit einer Auflösung von 2 µm.

Während der Arbeit entstehen vier Varianten des Wirbelstromsensors. Der Unterschied zwischen diesen Sensoren besteht im Vorhandensein eines magnetischen Kerns und Vertiefungen für Kontaktpads und Kern. Nach dem Aufbau des Sensors werden Messungen vorgenommen und die Ergebnisse miteinander verglichen.

Als erstes wird die induzierte Spannung in der Messspule ermittelt. Die Versuchsreihe wird mit einer Stahlprobe im Frequenzbereich zwischen 100 kHz und

20 MHz durchgeführt. Aus den Ergebnissen dieser Messreihe kann man ablesen, dass bei beiden Aufbauvarianten die in der Messspule induzierte Spannung mit der Frequenzerhöhung steigt.

Bei der zweiten Versuchsreihe werden Abstände zwischen Messobjekt und Wirbelstromsensor gemessen. Es werden drei unterschiedliche Materialien aus leitendem magnetisches Material (Stahl), schlechtleitendem magnetischem Material (Ferrit), leitendem nichtmagnetischem Material (Kupfer) für Messobjekte ausgewählt:

Dabei wurden folgende Tendenzen beobachtet, dass die induzierte Spannung bei der Abstandmessung mit leitendem magnetischem Objekt bei der Abstandserhöhung sinkt. Der Spannungsabfall bei der Abstandsvergrößerung von 10 μm auf 1.000 μm bei einer Messfrequenz von 1 MHz und Messung mit dem Sensor ohne magnetischen Kern beträgt 0,52 mV. Beim Aufbau mit magnetischem Kern erhöhte sich dieser Wert auf 0,56 mV.

Die induzierte Spannung bei der Abstandmessung mit nichtleitendem magnetischem Objekt steigt bei Abstandserhöhung. Der Spannungszuwachs bei der Abstandsvergrößerung von 10 μm auf 1.000 μm beträgt bei Messung mit dem Sensor ohne magnetischen Kern bei der Messfrequenz 1 MHz 0,65 mV. Bei Durchführung dieses Versuches mit dem Wirbelstromsensor mit magnetischem Kern liegt der Spannungszuwachs bei 2,34 mV.

Die induzierte Spannung bei Abstandmessung mit leitendem nichtmagnetischem Objekt zeigte die gleiche steigende Tendenz zur Spannungserhöhung mit zunehmender Entfernung bis zum maximal eingestellten Abstand von 1.000 μm wie bei der Messung mit nichtleitendem magnetischem Objekt. Die Differenz zwischen den in der Messspule induzierten Spannungen bei minimaler (10 μm) und maximaler (1.000 μm) Entfernung bei der Arbeitsfrequenz 1 MHz beträgt beim Aufbau ohne magnetischen Kern 0,92 mV und mit magnetischem Kern 1,66 mV.

Nach der Auswertung der Abstandmessungen mit unterschiedlichen Materialien beim Sensoraufbau ohne und mit magnetischem Kern kann man zusammenfassend folgende Aussagen treffen: Der Aufbau des Wirbelstromsensors mit magnetischem Kern ist besser geeignet für die Abstandserfassung bei allen Materialien. Er zeichnet sich durch eine höhere Empfindlichkeit aus. Bezüglich der Arbeitsfrequenz zeigte sich, dass bei höherer Frequenz die in der Messspule induzierte Spannung nicht nur größere Messwerte, sondern auch eindeutigere Messergebnisse geliefert werden.

Bei der Abstandmessung mit dem Wirbelstromsensor wird festgestellt, dass die Verwendung eines magnetischen Kernes höhere Spannungswerte liefert als der Aufbau ohne magnetischen Kern, was durch eine bessere Fokussierung von Wirbelströmen in das Messobjekt zu erklären ist.

10 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, einen Wirbelstromsensor zur Wegmessung in Dünnschichttechnik zu entwickeln und zu erproben. Die Aufgabenstellung umfasst nicht nur die Auslegung des Sensors und Zusammenstellung der mikrotechnologischen Schritte und Prozessfolge, sondern auch experimentelle Untersuchungen mit dem gefertigten Sensor.

Um für den Herstellungsprozess notwendige Werkstoff- und Prozessdaten zu erhalten, werden Voruntersuchungen zu den Abscheidungs- und Strukturierungsparametern von magnetischen, leitenden und isolierenden Schichten durchgeführt. Im Rahmen des Gesamtprozesses sollen die Einzelprozesse optimiert werden. Bei der Auswahl geeigneter Sensorwerkstoffe werden neben Simulationsergebnissen die Erfahrungen, die bei der Herstellung anderer Dünnschichtelemente gewonnen worden, hinzugezogen.

Beim Aufbau des Wirbelstromsensors spielt die Auswahl des magnetischen Materials eine große Rolle. Die Wahl von Nickel-Eisen erfolgt aufgrund seiner guten magnetischen Eigenschaften, die durch Einstellung der Abscheidungsparameter angepasst werden. Diese Nickel-Eisen Schichten zeichnen sich durch einen großen Permeabilitätswert, einen hohen Sättigungswert, ein geringes Koerzitivfeld und einen relativ hohen spezifischen Widerstand aus.

Ein weiterer wichtiger Aspekt neben der Auswahl des magnetischen Materials ist beim Entwurf des Kerns die Festlegung der Kerngeometrie. Dabei müssen die durch die Dünnschichttechnik auferlegten Einschränkungen bezüglich der Abmessungen mit einbezogen werden, wie z.B. die maximale Strukturhöhe und das Aspektverhältnis.

Beim Wirbelstromsensor ist ein geringer Spulenwiderstand wünschenswert. Deswegen wird Kupfer als Leiterwerkstoff ausgewählt. Es zeichnet sich durch eine hohe Leitfähigkeit sowie eine geringe Elektromigration und hohe Strombelastbarkeit aus. Bei kleineren Widerständen vermindern sich die Energieverluste, die zur Erwärmung des Sensors und einer Erhöhung der maximalen Strombelastbarkeit führen. Durch die Materialauswahl und eine geeignete Auslegung der Spulengeometrie kann der ohmsche Widerstand der Spulenstruktur minimiert werden.

Daneben kommt auch der Auswahl der Isolationsmaterialien bei der Herstellung des Wirbelstromsensors eine große Bedeutung zu. Neben anorganischem Aluminiumoxid zur Oberflächenisolierung kommen auch organische Werkstoffe zum Einsatz. Da bei der Herstellung des Wirbelstromsensors alle Strukturen in eine Photoresistschicht eingebettet sein sollen, ist die Planarisierbarkeit ein wichtiges Kriterium bei der Charakterisierung und Beurteilung von Isolierschichten.

Der Sensorentwurf basiert auf technologischen Voruntersuchungen. Die endgültige Festlegung der Sensorgeometrie erfolgt durch Hinzunahme von

Simulationsergebnissen und unter Berücksichtigung des Fertigungsaufwands. Parallel dazu wird die Prozessfolge zur Fertigung des Wirbelstromsensors entwickelt.

Der Wirbelstromsensor entsteht in vier unterschiedlichen Varianten. Die Varianten ohne und mit magnetischem Kern werden anschließend miteinander verglichen. Aus den Versuchen kann man entnehmen, dass der Aufbau des Wirbelstromsensors mit magnetischem Kern viel bessere Ergebnisse liefert. Das Vorhandensein des magnetischen Kerns hilft bei der Fokussierung des magnetischen Felds im Messobjekt. Dabei können höhere induzierte Spannungen gemessen werden als mit dem kernlosen Aufbau.

In der vorliegenden Arbeit werden Messungen mit den gefertigten Wirbelstromsensoren bei unterschiedlichen Frequenzen im Bereich von 100 kHz und 1 MHz durchgeführt. Diese Messungen zeigen, dass die Systeme bei höheren Frequenzen eine höhere Empfindlichkeit besitzen.

Die Messungen an den gefertigten Wirbelstromsensoren zeigen, dass die Prototypen für die Wegmessung gut geeignet sind. Bei den Untersuchungen kann man feststellen, dass diese Wirbelstromsensoren nicht nur bei der Abstandsmessung an leitenden Materialien, sondern auch bei magnetischen, schlecht leitenden Materialien wie Ferrit eingesetzt werden können. Bei den Abstandsuntersuchungen zwischen dem Wirbelstromsensor und einem Messobjekt sind kleinere Abstände vorteilhaft für die Materialerfassung und die Fehlermessung, da sie genauere Messergebnisse ermöglichen.

11 Literaturverzeichnis

- [ABR94] Abraham, M. , Bauer, H.-D., et. Al: „Realisation of Mass Fabricable Micro Optical Systems by Combination of Deep Etch X-ray Lithography, Elektroplating, Micromoldind and Stamping“, EUROPTO, Lindau, Germany,1994
- [AHN93] Ahn, Ch. et al.: „ A Planar Variable Reluctance Magnetic Micromotor with Fully Integrated Stator and Wrapped Coils“, Proc. IEE MEMS Workshop, pp. 1-6, 1993
- [AUF96] Aufricht, G., Balas, G., Heck, G., Konrad, W., Nussmüller, E., Theiretzbacher, H., Zimmerl, E. u.a.: „Zerstörungsfreie Prüfung“, WIFI Österreich, Wien, 1996
- [BAR88] Bargel, H.J., Schulze, G. :“Werkstoffkunde“, Düsseldorf, VDI Verlag, 1998
- [BEC80] Becker, R.: „Über die Prüfung auf Fehler in Metallischen Werkstoffen und Bauteilen mittels eines zerstörungsfreien Mehrfrequenz-Wirbelstrom-Prüfverfahrens“, Universität Saarbrücken, Dissertation, 1980
- [BER89] Bergmann W.: „Werkstofftechnik - Teil 1“, Hanser Verlag, 1989
- [BER91] Bergmann W.: „Werkstofftechnik - Teil 2“, Hanser Verlag, 1991
- [BIN96] Binneberg, A., Böhm, U., Spörl, G.: „Lageunabhängiger LN2-Kryostat für mobile SQUID-Meßsysteme in Supraleitung und Tieftemperaturtechnik“, S.281-284, Herausgeber VDI-Technologiezentrum, 1996
- [BLI97] Blitz, J.: „Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing“, 2nd Edition, Capman & Hall, 1997
- [BOL90] Boll, R.: „Weichmagnetische Werkstoffe“, Hrsg. Von Vakuumschmelze GmbH, Berlin, München: Verlag Siemens-Aktiengesellschaft, 1990
- [BOZ93] Bozorth, A. et al.: „Ferromagnetism“, New-York, IEEE Press, 1993
- [BRÜ01] Brück, R., Rizivi, N., Schmidt, A.: „Angewandte Mikrotechnik“, Hanser Verlag München, 2001
- [CAS93] Cascaval, C. N., Agherghinei, D., Rosu, D.: “Thermal Behaviour of Some Pra-Nonylphenol Formaldehyde Resins”, Journal of Thermal Analysis, Vol. 39, pp. 585-594, 1993

- [CHA03] Chady, T., Sikora, R.: "Optimisation of eddy-current sensor for multifrequency system", IEEE Transaction on magnetics, Vol. 39, No.3, May 2003
- [CHI64] Chikazumi, S: "Physics of magnetism", New - York: John Willey & Sons Inc., 1964
- [CHU87] Church, M.A.: US Patent 4,652,954, 1987
- [CHU98] Chung, S.-J., Hein, H., Schulz J.: „Strukturprofilsimulation dicker Schichten in der optischen Lithographie mit DNQ-Novolak-basierenden Photoresists“, Institut für Mikrostrukturtechnik, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, 1998
- [DOG00] Dogaru, T.; Smith, S. T.: „Edge Crack Detection Using a Giant Magnetoresistance Based Eddy Current Sensor“, Nondestruction Test, Evaluation, Vol. 16, pp. 31 - 53, 2000
- [ELB96] Elbel, T.: „Mikrosensorik: Eine Einführung in Technologie und physikalische Wirkungsprinzipien von Mikrosensoren“, F. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, 1996
- [ENG01] Engelberg, T.: „Geschwindigkeitsmessung von Schienenfahrzeugen mit Wirbelstrom - Sensoren“, Forschungs-Bericht VDI Reihe 8, Nr. 896, VDI Verlag, Düsseldorf 2001
- [FIS82] Fischer, H.: „Moderne Verfahren zur zerstörungsfreien Schichtdickenmessung“, Journal „Metalloberfläche“, Nr. 36, Heft 5, S. 231-238, 1982
- [FIS88] Fischer, K. H.: „Schweißverbindungen zerstörungsfrei geprüft“, Praktiker, Nr. 8, S. 378-380, 1988
- [FÖR52] Förster, F.: „Theoretische und experimentelle Grundlagen der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung mit Wirbelstromverfahren“, Teil I „Das Tastspulenverfahren“, Zeitschrift Metallkunde 43, S. 163-171, 1952
- [FÖR54] Förster, F.: „Theoretische und experimentelle Grundlagen der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung mit Wirbelstromverfahren“, Teil IV: „Die berührungslose Messung der Dicke und Leitfähigkeit von metallischen Oberflächen, Folien und Blechen“, Zeitschrift Metallkunde 45, S. 197-199, 1954

- [FON90] Fontana, R. E.: „Magnetic Thin Film Heads a Review of Processing Issues“, Symp. Magnetic Materials Process Devices, Vol 90, pp. 205-219, 1990
- [GAT97] Gatzen, H. H., Mätzig, J. C., Ruhbach, L. P.: “Grinding Tool Topography Analysis by White Light Interferometry and Atomic Force Microscopy - a Comparison”, Proceedings of the 9th IPES / 4th UME, Vol. 2, Braunschweig, pp. 245-248, 1997
- [GAT99] Gatzen, H. H., Siekmann, H.: “Plate Topography Influence on the Nanogrinding Process”, Proceedings of the 1999 Annual Meeting of the ASPE, pp. 83-86, 1999
- [GAT02] H.H. Gatzen, E. Andreeva, H. Iswahjudi: “Eddy-Current Microsensor Based on Thin-Film Technology“, Proc. IEEE Transaction on Magnetics, pp. 3368-3370, 2002
- [GHE82] Gherebzwow, I. P.: “Elektricheskie i magnitnie zepi: osnovi elektrotechniki“, Energoatomisdat, Leningrad, 1982
- [GRI02] Grimberg, R., Wooh, S-C., Savin, A., Steigmann, R., Prémel, D.: “A linear eddy current array transducer for rapid high-performance inspection”, Insight Vol 44, N5, May 2002
- [GUI83] Guillery P., Hezel R., Reppich B.: “Werkstoffe für die Elektrotechnik” Vieweg, 1983
- [HAM95] Hamasaki, Y., Ide, T. „Fabrication of multi-layer eddy current micro sensor for non-destructive inspection of small diameter pipes“, IEEE, pp. 232-237, 1995
- [HAN88] Hanabata, M.; Uetani, Y.; Furuta, A.: “Novolak Design for High Resolution Positive Photoresists (II): Stone Wall Model for Positive Photoresist Development”, Proc. SPIE 920, pp. 349ff, 1988
- [HOP98] Hoppe, B.: “Mikroelektronik 2”, Vogel-Verlag, Würzburg, 1998
- [HOR95] Hornbogen, E., Warlimont, H.: “Metallkunde: Aufbau und Eigenschaften von Metallen und Legierungen”, Springer Verlag, Berlin, 1996
- [ISW05] Iswahjudi, H.: “Simulationen zur Entwicklung von Wirbelstromsensoren in Dünnschichttechnik“, Dissertation, Universität Hannover, 2005
- [JAH96] Jahnel, W.: “Untersuchungen zur Wirbelstromprüfung von Metallischen Schutzschichten“, Dissertation, Universität Dortmund, 1996

- [JOH84] Johnson, D. W.: "Thermolysis of positive Photoresists", SPIE Vol. 469 Advantes of Resist Technology, pp. 72-79, 1984
- [KLE99] Klemmt, W.-B., Krause, H.-J., Kreutzbruck, M.V.: „Wirbelstromprüfung an Flugzeugstrukturen mit SQUID's“, The Journal's „Focus is on Nondestructive Testing“, Vol. 4. Nr.1, 1999
- [KNO85] Knopp, A., Pilato, L.A.: "Phenolic Resists", Springer Verlag, Berlin, 1985
- [KOH02] Kohlmeier, T., Gatzert, H. H.: „Challenges in using photosensitive embedding material to planarize multi-layer coils for actuator systems“, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Apr. 2002
- [KOU02] Kourouklis C., Kohlmeier T., Gatzert H.H.: "The Application of Chemical-Mechanical Polishing for Planarizing a SU-8/Permalloy Combination Used in MEMS Devices“, Proc. EMSA 2002, Athens, Greece
- [KÜP90] Küpfmüller, K. : „Einführung in die theoretische Elektrotechnik“, Springer-Verlag, Berlin, 1990
- [LAT89] Latter, T.: „A Guide to the Different Methods of Coating Thickness Measurements“, British Journal of NDT 31, Nr.7, pp. 372-378, 1989
- [LOR98] Lorenz, H., Despont, M., Fahrni, N., Brugger, J., Vettiger, P., Renaud, P.: „High-aspect-ratio, ultrathick, negative-tone near-UV photoresist and its application for MEMS“, Sensors and Actuators, Vol. 70, pp. 33-39, 1998
- [MAA01] Maas, M.: „Bestimmung von richtungsabhängigen Werkstoff-eigenschaften und Rissverläufen mit dem Wirbelstromprüfverfahren“, VDI-Verlag, Düsseldorf 2001
- [MAL96] Mallinson, J.C.: „Magnetoresistive Heads: Fundamentals & Applications“, Chapter 4: "The anisotropic Magnetoresistive Effect", Academic Press Inc., pp. 25-36, 1996
- [MAY93] Ma, Y.P., Wikswo, J. P.: „Detection of subsurface flaws using SQUID eddy current technique“, SPIE Vol. 2001, Nondestructive Inspection of Aging Aircraft, 1993
- [MCM86] McMaster, R. C.; McIntire, P.; Mester, M. L.: „Electromagnetic Testing, Nondestructive Testing Handbook“, 2nd ed., Vol. 4, American Society for Nondestructive Testing, 1986
- [MEN97] Menz, W., Mohr, J.: „Mikrosystemtechnik für Ingenieure“, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1997

- [MIC95] Michalowsky, L.: „Magnettechnik - Grundlagen und Anwendungen“, Leipzig Fachbuchverlag, 1995
- [MOR86] Morrison, Boyd: „Lehrbuch der Organischen Chemie“, VCH Verlag, 3. Aufl., 1986
- [MOS96] Moser, E., Balas, G.: „Zerstörungsfreie Oberflächenprüfverfahren“, WIFI Österreich, S. 16-24, Wien 1996
- [NEH92] Nehring, J.: „Fehler an metallischen Bauteilen kontrolliert mit Hilfe des Wirbelstrommessverfahrens“, Maschinenmarkt, Nr. 6, Würzburg 98, 1992
- [NIT97] Nitsche, K.: „Schichtmesstechnik“, Vogel-Verlag, Würzburg, 1997
- [OBR01] O'Brien, J. et al.: „Advanced Photoresist technologies for Microsystems. Journal of Micromechanics Engineering“, Vol. 11, pp. 353-358, Cork, Ireland, 2001
- [PFI92] Pfisterer, H., Junger, M.: „Eine Hilfe für die Praxis“, Carl Hanser Verlag, München, 1992
- [POP01] Popovic, R. S.; Randjelovic, Z.; Manic, D.: „Integrated Hall-effect Magnetic Sensors“, Sensors and Actuators, Vol. 91, pp. 46 - 50, 2001
- [RAC85] Racho, R., Kuklinski, P., Krause, K.: „Werkstoffe für die Elektrotechnik und Elektronik“, Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1985
- [RAI99] Raith, W.: „Lehrbuch der Experimentalphysik“, Bd. 2: „Elektromagnetismus“, Walter de Gruyter, Berlin-New York, 1999
- [REI03] Reimche, W., Heutling, B., Stock, M., Bach, Fr.-W., Kroos, J., Stolzenberg, M., Schulz, S., Westkämper, G.: „Inline-Materialcharakterisierung von feuerverzinktem Feinblech und Überwachung relevanter Bauseigenschaften mit einem Harmonischen-Messsystem“, Tagungsband "Werkstoffprüfung 2003", Bad Neuenahr-Ahrweiler, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 2003
- [RIS99] Rissing, L.: „Entwicklung und Herstellung eines magnetoelastischen Mikrosensors“, Dissertation, Universität Hannover, 1999
- [RÖP99] Röper, F.: „Abstandskompensierte Wirbelstrommessung von Foliendicke, Leitfähigkeit und Temperatur“, Dissertation, Universität Düsseldorf, VDI-Verlag, 1999

- [ROM80] Romankiv, L.T.: „Use of AZ-Typ photoresist as Insulation in Multiturn Thin Film Recording Heads“, IBM Technical Disclosure Bulletin, pp. 2484-2585, 1980
- [RUG84] Ruge, I., Madler, H.: „Halbleiter - Technologie“, Springer Verlag, Berlin, 1984
- [SAD00] Sandler, D.J., Ahn, C. H.: „On-chip eddy current sensor for crack detection in metall“, Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilti Head Island, South Carolina, June 2000
- [SAN01] Sandler, D.J., Ahn, C. H.: „On-chip eddy current sensor for proximity sensing and crack detection“, Sensor and Actuators A91, Proc. pp. 340-345, 2001
- [SAW02] Saweliev, I. W.: „Kurs obschej fiziki: elektrichestwo i magnetizm; uchebnoe posobie dlja wusow“, OOO Isdatel'stwo Astrel', OOO Isdatel'stwo ACT, 2002
- [SCH89] Schiff, A. : „Induktive und kapazitive Sensoren“, Grundlagen und Anwendung, 1989
- [SCH91] Schneider, M.: „Beitrag zur Dünnschichtmessung mittels Tastspul-Wirbelstromverfahren“, Dissertation, TH Ilmenau, 1991
- [SCH98] Schwind, M.: „Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren“, Dissertation, Universität Erlangen, 1998
- [SEL94] Sellen, M.: „Neues Messverfahren für Wirbelstrom-Abstandssensoren mit weitgehender Unterdrückung des Targeteinflusses“, Dissertation, Technische Fakultät der Universität des Saarlandes, 1994
- [SHA97] Shaw, J.M., Gelome, G. D., LaBianca, N. C., Conley, W. E.: „Negative Photoresist for optical lithography“, IBM Journal of Research and Development, 41, pp. 81-94, 1997
- [SHI90] Shibayama, Y.; Saito, M.: „Influence of Water on Photochemical Reaction of Positivetype Photoresist“, Japanese Journal of Appl. Phys., Vol. 29, No.10, pp. 2152 ff, 1990
- [SMI98] Smith, C.H.; Schneider, R.W.: „Magnetic Field Sensing Utilizing GMR Materials“, Sensor Review, Vol. 18, No. 4., pp. 230 – 236, 1998

- [STA97] Stavreva, Z. et al.: „Characteristics in Chemical-mechanical Polishing of Copper: Comparison of Polishing Pads“, Appl. Surf. Sci., Vol. 108, Amsterdam, Netherlands, pp. 39-44, 1997
- [SZE81] Sze, S. M.: „Physics of Semiconductor Devices“, John Wiley & Sons, New York, 1981
- [UME91] Umesaki, M. et al.: „A new Horizontal Thin Film Head“, IEE Transaction on Magnetics, Vol. 327, No 6, pp. 4933-4935, Nov. 1991
- [WID88] Widmann, D., Mader H., Friedrich H.: „Technologie hochintegrierter Schaltungen“, Springer-Verlag, 1988
- [WOG03] Wogerstein, A., Samson, S., Güttler, J., Beißnet, S., Büttgenbach, S.: „Novell inductive eddy current sensor for angle measurement“, IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 39, May 2003
- [ZMO98] Zmood, R.B., Yu, P.L.: „Eddy Current Microsensor for Use in Micromashine Applications“, Journal of intelligent material systems and structures, Vol. 9, November 1998

Normen

- DIN 54140 Teil 3 (01.89): „Zerstörungsfreie Prüfung. Induktive Verfahren. Darstellung und allgemeine Eigenschaften von Spulensystemen“, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
- DIN 54142 Teil 1 (02.90): „Zerstörungsfreie Prüfung. Wirbelstromprüfung mit Tastspulen. Allgemeines“, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
- DIN 54143 (11.93): „Zerstörungsfreie Prüfung. Wirbelstromprüfung. Elektrische Kenngrößen von Wirbelstromprüfgeräten (Vorschlag für eine Europäische Norm)“, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
- VER02 „Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen“, BGBl I S. 1869 36/2002

12 Anhang

Persönliche Daten

Name Ekaterina Andreeva
Anschrift Hünnergshagen 52
 28755 Bremen
geboren am 04.06.1976 in Moskau, Russland
Familienstand ledig
Staatsangehörigkeit russisch

Schul Ausbildung

09/1983 - 08/1993 Moskauer Mittelschule

Studium

09/1993 - 08/1997 Moskauer Staatliche Berguniversität, Fakultät Maschinenbau,
Fachrichtung: Bergbaukunde, Institut für Bergmaschinen und
Ausrüstung für Untertage- und Tagebau
Abschluss: Bachelor
09/1997 - 07/ 1998 TU Bergakademie Freiberg (Sachs.), Deutsche Sprachkurse
am Studienkolleg für ausländische Studierende
Abschluss: Zeugnis
03/1998 - 10/1999 TU Bergakademie Freiberg (Sachs.), Fakultät für
Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik, Institut für
Maschinenbau, Lehrstuhl für Bergbaumaschinen und
Spezialtiefbautechnik.
Thema der Diplomarbeit: „Energieoptimierter Einsatz verrohrter
Erdböhrgeräte durch Mantelreibungsprognose“
Abschluss: Diplom - Ingenieur

Praktika

07/1996 Dreiwöchiges Praktikum beim Moskauer Bergbau Unternehmen
„Metropoliten“ (Russland)
Abschluss: Bericht
05/1999 TU Bergakademie Freiberg,
Praktikum für das Prüfungsfach: Bergbau- und
Erdbbaumaschinen, Spezialtiefbautechnik
Abschluss: Bericht

Sonstiges

Veröffentlichungen: H.H. Gatzel, E. Andreeva, H. Iswahjudi: "Eddy-Current
Microsensor Based on Thin-Film Technology", Proc. IEEE
Translation on Magnetism, pp. 3368-3370, 2002

Hannover, 25.02.2005